COLUMBIA LIBRARIES OFFSITE
HEALTH SCIENCES STANDARD
HX64104117
QP481 .K832 Uber den Helligkeits
RECAP

QP481 K832

COLUMBIA UNIVERSITY
DEPARTMENT OF PHYSIOLOGY
THE JOHN G. CURTIS LIBRARY

From the library of
C. Ludwig, 1895.

Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität.

Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität.

Nach
gemeinsam mit R. Ritter ausgeführten Versuchen.

Von

A. König.

Hamburg und Leipzig.
Verlag von Leopold Voss.
1891.

SD 481
K232

Inhalts-Verzeichnis.

		Seite.
§ 1.	Einleitung — Geschichtliches	7
§ 2.	Apparate	17
§ 3.	Methode der Untersuchung	23
§ 4.	Versuchsergebnisse	33
§ 5.	Allgemeine Besprechung der Versuchsergebnisse	39
§ 6.	Die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte bei hoher Intensität	43
§ 7.	Die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte bei sehr niedriger Intensität und ihre Beziehung zu angeborenen monochromatischen Farbensystemen	50
§ 8.	Die untere Reizschwelle	55
§ 9.	Bestimmung der Helligkeitswerte in einem Spektrum mit gleichmässiger Energieverteilung	60
§ 10.	Die partielle Farbenblindheit und ihre Erklärung aus der Theorie der Gegenfarben	66
§ 11.	Die totale Farbenblindheit und ihre Erklärung aus der Theorie der Gegenfarben	70
§ 12.	Schlussbemerkungen	83

Digitized by the Internet Archive
in 2010 with funding from
Open Knowledge Commons (for the Medical Heritage Library project)

http://www.archive.org/details/berdenhelligke00kn

§ 1. Einleitung — Geschichtliches.

Dafs verschieden gefärbte Felder in Bezug auf ihre Helligkeit bis zu einem gewissen Grade miteinander verglichen werden können, ist eine ebenso unbezweifelbare Erfahrungsthatsache, wie andererseits zugegeben werden mufs, dafs hierbei niemals diejenige Genauigkeit erreicht werden kann, welche hinsichtlich gleich gefärbter Felder möglich ist. Farbige Bilder werden durch Radierungen, Lithographien u. s. w. nicht nur in den Konturen der dargestellten Gegenstände, sondern auch in deren Helligkeitsabstufungen reproduziert; aber die darin bestehende Unsicherheit tritt uns entgegen, wenn wir zwei verschiedene Stiche desselben Gemäldes nebeneinander betrachten, wobei wohl auch einiges der berechtigten Freiheit künstlerischer Umgestaltung zuzuschreiben ist.

Den Anfang einer solchen Helligkeitsvergleichung und -messung verschiedener Farben, für welche Hr. E. v. BRÜCKE die Bezeichnung »heterochrome Photometrie« eingeführt hat, finden wir, soviel ich weifs, bei J. NEWTON,[1] der über die Helligkeit der Farben des Spektrums folgenden Ausspruch thut: »It is to be noted, that the most luminous of the prismatic colours are the yellow and orange. These affect the senses more strongly than all the rest together; and next to these in strength are the red and green. The blue com-

[1] J. NEWTON, *Opticks*. Book I. Part I. Prop. VII. Theor. VI.

pared with these is a faint and dark colour, and the indigo and violet are much darker and fainter, so that these compared with the stronger colours are little to be regarded.« An demselben Orte erwähnt er auch, dafs die hellste Stelle nicht in der Mitte des Spektrums, also nicht an der Grenze von Grün und Blau liege, sondern zwischen Orange und Gelb. NEWTON stellt diese Betrachtungen an, um diejenige Ebene zu finden, in der das von einer Linse erzeugte Bild am schärfsten erscheint.

Von J. FRAUNHOFER[1] sind dann aus ähnlicher Veranlassung zum ersten Male wirkliche Messungen ausgeführt worden, indem er ein weifses, von einer Öllampe erleuchtetes Feld nacheinander neben die verschiedenen Teile des Spektrums brachte und nun die Helligkeit des weifsen Feldes jedesmal so lange veränderte, bis sie der des farbigen Feldes gleich erschien. Die hierzu erforderlichen relativen Helligkeiten des weifsen Feldes waren bei der getroffenen Anordnung nach physikalischen Prinzipien leicht zu berechnen. Aus den Mittelwerten von nur vier untereinander wenig übereinstimmenden Versuchsreihen wurde dann eine Intensitätskurve über dem benutzten Dispersionsspektrum als Abscissenaxe gezeichnet. Es ist dieses diejenige Kurve, welche zur Darstellung der Helligkeitsverteilung im Spektrum in den Lehrbüchern der Physik und Physiologie noch jetzt vielfach abgebildet und bei der Berechnung achromatisierter Linsen wohl ausschliefslich zu Grunde gelegt wird.[2] Die so erhaltene Kurve hat beinahe denselben Verlauf wie diejenige, welche K. v. VIERORDT[3] dann mehr als

[1] J. FRAUNHOFER, *Denkschriften der bayrischen Akademie.* Bd. V. S. 193. München 1817. (*Gesammelte Schriften.* München 1888. S. 1.)

[2] Vergl. A. STEINHEIL und E. VOIT, *Handbuch der angewandten Optik.* Bd. I. Voraussetzungen für die Berechnung optischer Systeme und Anwendung auf einfache und achromatische Linsen. Leipzig 1891.

[3] K. VIERORDT, *Pogg. Ann.* Bd. 137. S. 200. 1869. — und *Die Anwendung des Spektralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes.* Tübingen 1871.

fünfzig Jahre später als »Kurve der Stärke des farbigen Lichtes« im Sonnenspektrum veröffentlichte, die aber nach einer ganz anderen Methode gewonnen war und thatsächlich nicht die Helligkeit der verschiedenen Spektralfarben, sondern die Menge desjenigen weifsen Lichtes angiebt, welches an den verschiedenen Stellen des Spektrums erforderlich war, um durch seine Zumischung eine eben merkliche Abnahme der Sättigung zu bewirken. Dafs beide Kurven einen so ähnlichen, ja, abgesehen vom blauen und violetten Teile des Spektrums, fast gleichen Verlauf haben, deutet auf einen inneren Zusammenhang hin, der einer weiteren Verfolgung noch wert ist[1]; vor allem müfste untersucht werden, ob bei Zumischung einer eben merklichen Menge eines farbigen, an Stelle des von VIERORDT benutzten weifsen Lichtes eine gleiche Kurve entstände.

Ob die erwähnte Abweichung an dem blauen Ende des Spektrums zwischen den von FRAUNHOFER und VIERORDT erhaltenen Werten von objektiver Verschiedenheit des zerlegten Sonnenlichtes, oder von der Benutzung verschiedener Untersuchungsmethoden, oder von dem sogenannten, übrigens auch bei VIERORDTs Beobachtungen deutlich hervortretenden PURKINJEschen Phänomen, zu dessen Besprechung wir uns nunmehr wenden, herruhrt, mufs unentschieden bleiben.

Über den Einflufs der absoluten Intensität auf die relative Helligkeit der verschiedenen Farben hat J. PURKINJE die ersten Beobachtungen gemacht. Er beschreibt seine darauf bezüglichen Versuche mit folgenden Worten:[2]

»Objektiv hat der Grad der Beleuchtung grofsen Einflufs auf die Intensität der Farbenqualität. Um sich davon recht

[1] Vergl. H. v. HELMHOLTZ, *Zeitschr. für Psychologie u. Physiologie der Sinnesorgane.* Bd. II. S. 1. 1891.

[2] J. PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne.* Zweites Bändchen. Neue Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjektiver Hinsicht. Berlin 1825. S. 109—110.

lebendig zu überzeugen, nehme man vor Anbruch des Tages, wo es eben schwach zu dämmern beginnt, die Farben vor sich. Anfangs sieht man nur schwarz und grau. Gerade die lebhaftesten Farben, das Rot und das Grün, erscheinen am schwärzesten. Das Gelb kann man von Rosenroth lange nicht unterscheiden. Das Blau war mir zuerst bemerkbar. Die roten Nuancen, die sonst beim Tageslicht am hellsten brennen, nämlich karmin, zinnober und orange, zeigen sich lange am dunkelsten, durchaus nicht im Verhältnisse ihrer mittleren Helligkeit.«

Das Ergebnis dieser Beobachtung läfst sich in folgenden Sätzen zusammenfassen:

1. Es sind noch Helligkeitsunterschiede vorhanden, wenn infolge der geringen Beleuchtung alle Farbenunterschiede verschwunden sind.

2. Bei geringer Beleuchtung ist das Verhältnis der relativen Helligkeit der verschiedenen Farben ein anderes, als bei gewöhnlicher Tagesbeleuchtung, und zwar haben die roten Farben am meisten von ihrer Helligkeit eingebüfst, während Blau am wenigsten beeinflufst wird.

Der in dem zweiten dieser beiden Sätze erwähnte Unterschied in dem Verhalten verschiedener Farben wird neuerdings vielfach das »PURKINJEsche Phänomen« genannt.

Die von PURKINJE in der Morgendämmerung zuerst gesehene Abhängigkeit der scheinbaren Helligkeit verschieden gefärbter Pigmente von der Stärke der Beleuchtung mufs sich natürlich auch in der Abenddämmerung, dann aber in umgekehrter Reihenfolge zeigen, d. h. es mufs das Rot zuerst, das Blau zuletzt seine Helligkeit verlieren. Dieses scheint nun mehrfach beobachtet worden zu sein, denn SEEBECK[1] sagt im Jahre 1837 in seiner für unsere Kenntnis der partiellen Farbenblindheit grundlegenden Abhandlung:

[1] A. SEEBECK, *Pogg. Ann.* Bd. 42. S. 222. 1837.

»In der Dämmerung verschwinden bekanntlich die wenigst brechbaren Strahlen zuerst aus dem Lichte der Atmosphäre, wodurch die bekannten Änderungen in dem Ansehen der Farben entstehen.«

Die Erklärung wird freilich hier fälschlich in einer objektiven Änderung der Zusammensetzung des Tageslichtes mit fortschreitender Dämmerung gesucht; aber die Erscheinung selbst ist an einer ganzen Reihe von Beobachtungen, die mit den verschiedenfarbigsten Pigmenten besonders von farbenblinden Personen ausgeführt sind, richtig beschrieben.

H. Dove[1] hat später dann dieselbe Erscheinung, ohne anfänglich von den Seebeckschen Angaben etwas zu wissen, ebenfalls bei der Abenddämmerung in Gemäldegallerien beobachtet. Er untersuchte sie eingehend vermittels roter und blauer Gläser, beschränkte sich aber auf diese beiden Farben.

Weitere Beobachtungen an Pigmentfarben liegen noch vor von Hrn. Grailich[2] und Hrn. Aubert.[3]

Hr. H. v. Helmholtz[4] hat zuerst die relative Helligkeit von Spektralfarben nach dieser Richtung hin untersucht. Er fand, dafs eine verschiedene Abhängigkeit zwischen Reizstärke und Empfindungsstärke nicht nur zwischen zwei spektralen Lichtern besteht, von denen das eine dem langwelligen, das andere dem kurzwelligen Teile des Spektrums angehört, sondern dafs sie auch, freilich in geringerem Mafse, hervortritt, wenn die beiden Farben derselben Hälfte des Spektrums entnommen sind; am geringsten ist sie, wenn dieses der weniger brechbare Teil des Spektrums

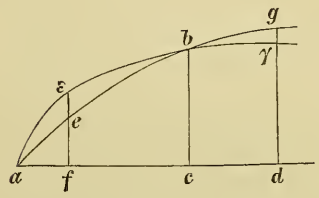
[1] H. W. Dove, *Ber. der Berliner Akad.* 1852. S. 69. — *Pogg. Ann.* Bd. 85. S. 397. 1852. — *Darstellung der Farbenlehre und optische Studien.* Berlin, 1853. S. 183.

[2] J. Grailich, *Sitzungsber. der Wiener Akad.* Bd. 54. S. 252. 1854.

[3] H. Aubert, *Physiologie der Netzhaut.* Breslau 1865. S. 125.

[4] H. Helmholtz, *Pogg. Ann.* Bd. 94. S. 18—21. 1855. (*Wissenschaftliche Abhandl.* Bd. II. S. 61—64. Leipzig 1883.) und *Physiolog. Optik.* 1. Aufl. S. 317. Leipzig 1867.

ist. Haben zwei verschieden gefärbte Felder bei einer mittleren Intensität gleiche Helligkeit, so wird nach gleicher Verminderung der objektiven Intensität beider dasjenige Feld, welches von dem kurzwelligeren Lichte erleuchtet ist, das hellere sein, während nach einer Vergrößerung der objektiven Intensität das langwelligere heller aussieht. Man kann die Erscheinung auch in folgender Weise beschreiben: Geht man von zwei verschieden gefärbten Feldern gleicher Helligkeit aus, so ändert sich bei gleicher objektiver Veränderung der Reizstärke die Intensität der Empfindung bei dem kurwelligeren Lichte stets weniger als bei dem langwelligeren.



An dem Beispiele eines gelben und eines violetten Lichtes erläutert Hr. H. v. HELMHOLTZ in der ersten Auflage seines *Handbuches der Physiol. Optik*[1] die Erscheinung in folgenden Worten an nebenstehender Figur.

»Die horizontalen Koordinaten längs der Linie *a d* mögen den objektiven Lichtstärken proportional sein, die vertikalen der Intensität der Lichtempfindung. Es stelle *a e b g* die Kurve für die Intensität der Empfindung des gelben Lichtes dar, und es seien die Einheiten des gelben und violetten Lichtes so gewählt, dafs für die Lichtmenge *a c* die Empfindungsstärke in beiden Lichtarten die gleiche sei, so folgt aus den angegebenen Thatsachen, dafs die Kurve, welche die Empfindungsstärke des violetten Lichtes ausdrückt, die Lage *a ε b γ* gegen die frühere haben müsse. Verkleinert man beide Lichtmengen im Verhältnis *a f* : *a c*, so findet man für das gelbe Licht die Empfindungsstärke, ausgedrückt durch die Linie *f e*, kleiner als die Empfindungsstärke *f ε* des Violett. Umgekehrt, wenn man beide Lichtmengen auf die Größe *a d*

[1] H. HELMHOLTZ, *Physiolog. Optik.* 1. Aufl. S. 318. Leipzig 1867.

bringt, findet sich die zugehörige Empfindungsstärke des Gelb dg gröfser, als die des Violett $d\gamma$.«

Diese Auffassung des PURKINJEschen Phänomens ist seitdem unverändert beibehalten worden, bis Hr. E. BRODHUN[1] fand, dafs dasselbe mit steigender Helligkeit der verglichenen Farben immer mehr und mehr abnimmt, und dafs sich, wenigstens bei den von ihm untersuchten drei Personen (A. KÖNIG = normaler Trichromat, E. BRODHUN = »Grünblind« und R. RITTER = »Rotblind«) eine Helligkeit angeben liefs, oberhalb welcher es durch die unvermeidlichen Beobachtungsfehler und die in der Natur der Sache liegenden Schätzungsunsicherheiten verdeckt wurde. Nimmt man als Mafs der Helligkeit diejenige Einheit, welche in der gemeinsam von Hrn. E. BRODHUN und mir ausgeführten experimentellen Untersuchung über die psychophysische Fundamentalformel[2] benutzt und definiert ist, nämlich diejenige Helligkeit, in welcher einem durch ein Diaphragma von 1 qmm blickenden Auge eine mit Magnesiumoxyd überzogene Fläche[3] erscheint, die in einem Abstand von 1 m durch eine ihr parallel stehende 0,1 qcm grofse Fläche von schmelzendem Platin senkrecht bestrahlt wird, so fand Hr. BRODHUN die obere Grenze für einen noch sicher nachweisbaren Grad des PURKINJEschen Phänomens bei etwa 15 dieser Einheiten[4]. Es mag an dieser Stelle schon erwähnt werden, dafs in der vorliegenden Untersuchung eine obere Grenze des PURKINJEschen Phänomens bei mir nicht gefunden wurde, obschon Helligkeiten bis zu ca. 600 der eben definierten Einheiten untersucht wurden; bei Hrn. R. RITTER

[1] E. BRODHUN, *Beiträge zur Farbenlehre.* Inaug.-Dissertat. Berlin 1887.

[2] A. KÖNIG und E. BRODHUN, *Sitzungsber. der Berl. Akad. vom 26. Juli 1888 und 27. Juni 1889.*

[3] Vergl. A. KONIG, *Gräfes Archiv.* Bd. 30 (2). S. 162. 1884 — und *Wied. Ann.* Bd. 22. S. 572. 1884.

[4] Hr. E. BRODHUN benutzt in seiner Inaugural-Dissertation eine andere Helligkeitseinheit, doch ist die Umrechnung auf die von uns beiden später eingeführte und oben definierte sehr einfach.

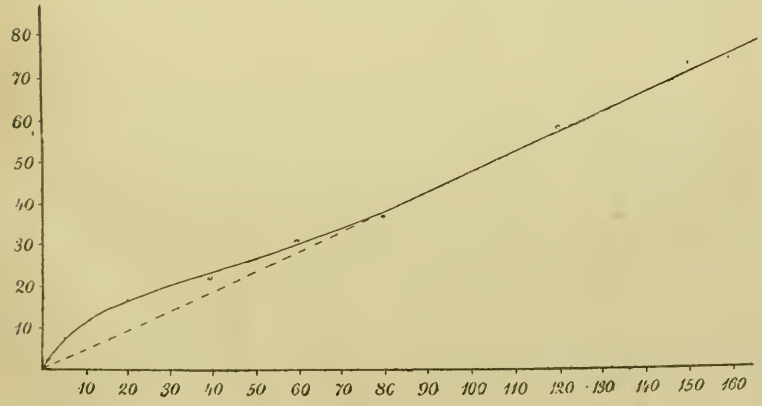
hingegen fand sich jetzt ungefähr dieselbe Grenze wie damals. Bei Hrn. E. BRODHUN habe ich keine erneute Prüfung daraufhin angestellt. Der Widerspruch zwischen meinen frühern und jetzigen Beobachtungen ist aber nur scheinbar. Die Abweichung erklärt sich sofort bei einer Vergleichung der benutzten Intensitätsintervalle. Würde Hr. BRODHUN ebenso hohe Helligkeiten benutzt haben, wie sie jetzt angewendet werden konnten, so hätte sich ohne Zweifel auch damals das jetzt erhaltene Resultat ergeben. Das PURKINJEsche Phänomen ist bei den Helligkeiten zwischen 15 und 400 unserer Einheiten schon sehr schwach und kann erst durch starke Variation der Intensität nachgewiesen werden. Hr. BRODHUN hatte überhaupt nur Intensitäten bis zu etwa 30 Helligkeitseinheiten zur Verfügung und war daher nicht im stande, die Erscheinung weiter zu verfolgen. Wir werden später noch Gelegenheit haben, auf die Schwierigkeit und Unsicherheit einer solchen Grenzbestimmung näher einzugehen.

Hr. E. BRODHUN giebt entsprechend den von ihm erhaltenen Resultaten eine von der HELMHOLTZschen in der Form abweichende graphische Darstellung des PURKINJEschen Phänomens. Trägt man bei verschiedenen absoluten Intensitäten die zur Herstellung gleicher Helligkeit erforderlichen, etwa in Spaltbreiten des benutzten Spektralapparates ausgedrückten Lichtmengen in der Weise graphisch auf, dafs das rote Licht als Abscisse, das blaue als Ordinate genommen wird, so müfste man ohne Vorhandensein des PURKINJEschen Phänomens eine Gerade erhalten, welche durch den Anfangspunkt der Koordinaten ginge. Das PURKINJEsche Phänomen in der Form, wie es Hr. BRODHUN gefunden, bewirkt aber, dafs eine Kurve entsteht, welche bei gröfseren Intensitäten zwar mit dieser Geraden zusammenfällt, bei niederen jedoch von ihr nach obenhin abweicht. Nehmen wir als Beispiel die Zahlenwerte einer von mir ausgeführte Vergleichung der Helligkeiten von zwei Licht-

arten der Wellenlänge 670 $\mu\mu$ und 450 $\mu\mu$[1] (wobei in der letzten Columne Differenzen von weniger als 5% nicht angegeben sind, da sie innerhalb der Beobachtungsunsicherheit liegen):

450 $\mu\mu$ Spaltbreite	670 $\mu\mu$ Spaltbreite	Gerade	Differenz der Beobachtung	Differenz in Prozenten
5	7.2	2.3	4.9	213 %
10	10.0	4.6	5.4	117 %
20	16.7	9.2	7.5	82 %
40	21.4	18.5	2.9	16 %
60	30.5	27.7	2.8	10 %
80	36.4	37.0	—	—
120	56.3	55.4	—	—
160	72.9	73.9	—	—

In der nachstehenden Figur sind diese Ergebnisse in der angegebenen Weise graphisch dargestellt.



Der Verlauf der Kurven war bei einer solchen Vergleichung mit Licht von der Wellenlänge 670 $\mu\mu$ für alle Teile des Spektrums vom violetten Ende bis zur Wellenlänge

[1] S. 24 der BRODHUNschen Dissertation.

570 $\mu\mu$ sowohl für Hrn. BRODHUN als auch für mich ein völlig analoger; hingegen war für Licht gröfserer Wellenlänge kein PURKINJEsches Phänomen mehr zu beobachten.

Auf Grund dieser Ergebnisse stellte Hr. BRODHUN dann eine Kurve der Helligkeitsverteilung im Spektrum für die drei von ihm untersuchten, schon genannten Personen auf, die oberhalb einer Helligkeit von 15 Einheiten unabhängig von der absoluten Intensität sein sollte, und die daher, sobald die objektiven, physikalischen Intensitätskoeffizienten bekannt sind, von einem Dispersionsspektrum auf das Interferenzspektrum, von einer Lichtquelle auf eine andere umzurechnen sei. Wenn auch, wie oben schon erwähnt ist, wenigstens bei meinem Farbensystem nach der vorliegenden Untersuchung die thatsächlichen Verhältnisse etwas anders sind, so verdanken wir doch Hrn. BRODHUN die erste Bestimmung von Helligkeitskurven, bei der der wesentlichste in Betracht kommende, bis dahin aber nicht beachtete Gesichtspunkt deutlich erkannt ist und die davon herrührenden Fehler thunlichst vermieden sind.

Es sollen daher an dieser Stelle diejenigen Bestimmungen der spektralen Helligkeitsverteilung übergangen werden, welche aufser den schon erwähnten, zum Teil nach nicht einwurfsfreien Methoden aus, und deswegen das angestrebte Ziel gar nicht erreichend, zum Teil ohne Berücksichtigung des bisher Geleisteten ausgeführt worden sind.

Die vorliegende Arbeit knüpft unmittelbar an die BRODHUNsche Untersuchung an. Die Intensitäten wurden nach obenhin bis zu der schon angegebenen Helligkeit gesteigert, und nach untenhin wurde in geeigneten Abstufungen die Intensität so lange verringert, bis man an dem durch die Natur unseres Auges bedingten Ende dieser Reihe, nämlich der Reizschwelle, angelangt war.

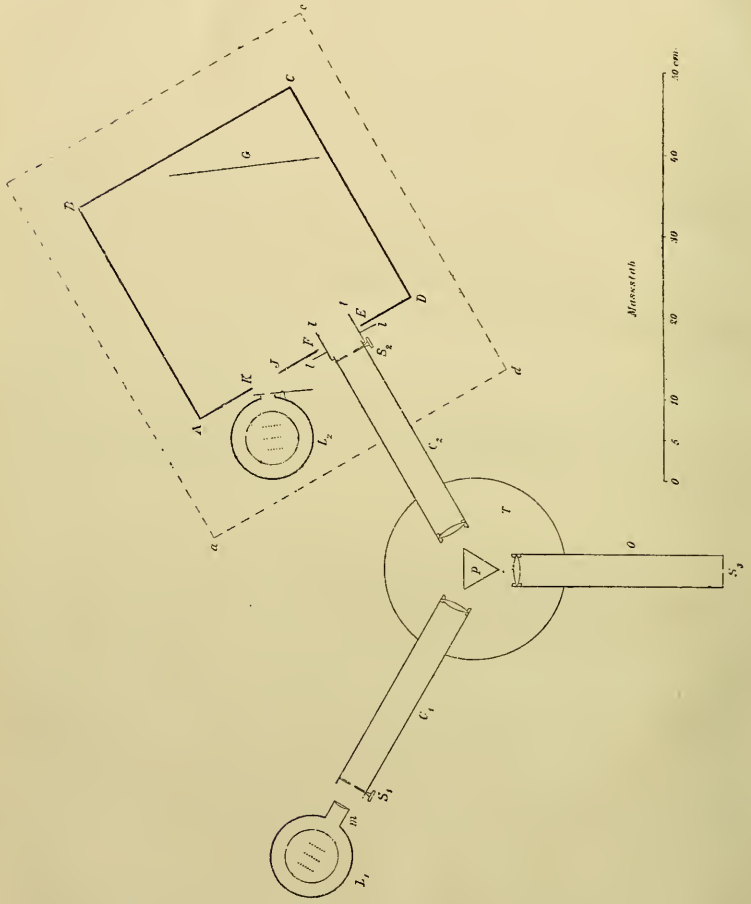
Die Untersuchung wurde gemeinsam von Herrn Dr. R. RITTER und mir begonnen. Auf unsere Farbensysteme be-

ziehen sich daher auch die meisten der mitgeteilten Beobachtungen. Leider wurde Herr RITTER durch zwingende Verhältnisse genötigt, zu verreisen und daher seine Mitarbeit zu unterbrechen, ehe die in dem ursprünglichen Plan enthaltenen Beobachtungsreihen vollständig ausgeführt und der Zusammenhang des schon Erhaltenen, sowohl untereinander als zu den Ergebnissen anderweitiger Untersuchungen, einer völligen Verarbeitung und Durchrechnung unterzogen war. An seine Stelle trat dann meine Schwägerin, Fräulein ELSE KÖTTGEN, die selbst noch mehrere Beobachtungsreihen ausführte und deren geschickte und ausdauernde Hülfe beim Beobachten und Rechnen es mir allein ermöglichte, noch innerhalb der durch den gegebenen Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Festschrift bedingten Frist die Arbeit so weit durchzuführen, als es die vorhandenen experimentellen Hülfsmittel überhaupt gestatten.[1] Ihr und allen im folgenden noch genannten Personen, welche bereitwilligst die von mir gewünschten Bestimmungen machten, vor allem aber Herrn RITTER, bin ich zu grofsem Danke verpflichtet.

§ 2. Apparate.

Zur Ausführung der Versuche diente derselbe HELMHOLTZsche Farbenmischapparat, den auch Hr. E. BRODHUN benutzt hat und den mir Hr. Professor A. KUNDT aus der Sammlung des hiesigen Physikalischen Instituts in dankenswerter Weise bereitwilligst zur Verfügung stellte. Die Doppelspathe aber, sowie die NICOLschen Prismen und die mit Alaunlösung gefüllten Glaskästen zwischen den Lampen und

[1] Binnen kurzem hoffe ich in der Lage zu sein, an einem weit vollkommeneren Apparate die jetzt nur in ihren Grundzügen angefangene Arbeit fortzusetzen. Vor allem glaube ich, dann auch die Gesichtspunkte berücksichtigen zu können, welche Hr. E. v. BRÜCKE in seiner Abhandlung über »Die heterochrome Photometrie« (Über einige Konsequenzen der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie. II. Abhandl. *Sitzungsber. der Wiener Akademie.* Bd. 84. 1881) entwickelt.


Massstab
0 5 10 20 30 40 50 cm

den Spalten waren entfernt; daher war die jetzt erreichbare Maximal-Intensität höher als bei Hrn. BRODHUN, die Dispersion von der früheren etwas verschieden und daher auch die relative Intensität der einzelnen Teile des Spektrums eine etwas andere. Die nebenstehende Figur giebt in schematischer Weise eine Darstellung der benutzten Gesamtanordnung.

Die runde Metallplatte T trägt das auf allen drei Seiten geschliffene gleichseitige Flintglasprisma P, die beiden Collimatoren C_1 und C_2, welche an den Enden bilaterale, durch Mikrometerschrauben mefsbare Spalte S_1 und S_2 besitzen, und endlich das Okular-Rohr O, das am vorderen Ende einen kleinen vertikalen Spalt S_3 von 1.85 mm Höhe und 0.8 mm Breite hat. Diese geringe Breite ist erforderlich, um möglichst homogene Farben in das Auge gelangen zu lassen, während die geringe Höhe eingehalten werden mufs, damit auch bei den hellsten Intensitäten sie noch stets von dem Pupillendurchmesser übertroffen wird. Werden die Spalte S_1 und S_2 erleuchtet, so erscheinen einem durch S_3 blickenden Auge zwei spektral leuchtende, in einer vertikalen Geraden (der vorderen Prismenkante) aneinanderstofsende Halbkreise. Ihre Farbe hängt ab von der jedesmaligen Stellung des betreffenden Collimatorrohres, und die Wellenlänge des betreffenden Lichtes kann in bekannter Weise durch Spiegelablesung am Collimatorrohre vermittels Fernrohr und Skala genau bestimmt werden. Für den rechten Halbkreis, der also dem linken Collimatorrohr C_1 entspricht, wurde stets Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ benutzt. Die Beleuchtung geschah durch einen »Triplex-Gasbrenner« L_1, in dem drei parallele Flammen zuerst von einem in dem mittleren Teile elliptischen Glascylinder, dann von einem runden Thoncylinder umgeben sind. Der letztere hat einen kurzen Metallansatz m, der eine Konvexlinse enthält, in deren Brennpunkt sich die mittlere der drei Flammen befindet. Die Intensität wurde durch den

Spalt S_1 und vorgesetzte grüne Absorptionsgläser verändert. Der linke Halbkreis wurde durch entsprechende Stellungen des rechten Collimatorrohres C_2 mit Licht von den Wellenlängen 670 $\mu\mu$, 650 $\mu\mu$, 625 $\mu\mu$, 605 $\mu\mu$, 590 $\mu\mu$, 575 $\mu\mu$, 555 $\mu\mu$, 535 $\mu\mu$, 520 $\mu\mu$, 505 $\mu\mu$, 490 $\mu\mu$, 470 $\mu\mu$, 450 $\mu\mu$ und 430 $\mu\mu$ bei jeder der näher untersuchten Intensitäten erleuchtet. Die Wellenlängen 505 $\mu\mu$ und 470 $\mu\mu$ wurden gewählt, weil sie nach einer gemeinsam von Hrn. C. DIETERICI und mir[1] ausgeführten Untersuchung hinsichtlich des Farben-

[1] A. KÖNIG und C. DIETERICI, *Sitzungsber. der Berliner Akademie.* 29. Juli 1886. Hr. E. HERING hat die Resultate dieser Abhandlung bisher nur in zwei beiläufigen Anmerkungen einer Kritik unterzogen (*Pflügers Arch.* Bd. 41. S. 44. 1887 und Bd. 47. S. 425. 1890). Worin unsere »ganz willkürlichen, zum Teil nachweisbar irrigen, zum Teil das Endergebnis bereits präjudizierenden Annahmen« zum Aufbau der Intensitätskurven der Elementarempfindungen, sowie die »falsche Deutung und Benutzung einer an sich brauchbaren Formel« bei der Umrechnung dieser Kurven in die Kurven der Grundempfindungen bestehen, vermag ich auch bei vorurteilsfreiester Durchsicht der vor fünf Jahren geschriebenen Abhandlung noch immer nicht zu finden. Ich mufs daher von jeder Rechtfertigung der damals gemachten Schlufsfolgerung absehen. Für die Bemerkung, welche sich auf die Angabe der Farbentöne der Grundempfindungen bezieht, bin ich Hrn. HERING dankbar, da ich durch dieselbe angespornt werde, mich in der Ausarbeitung meiner Abhandlungen einer gröfseren Schärfe des Ausdruckes zu befleifsigen. Wir haben damals den Farbenton der drei »Grundempfindungen« (der YOUNGschen Farbentheorie) zu bestimmen versucht und gelangten zu dem Resultat, dafs unsere Beobachtungen dann ziemlich widerspruchsfrei zu vereinigen waren, wenn man als Farbenton der Grundempfindungen annahm:

1. ein Rot, welches etwas von dem äufsersten Spektralrot nach dem Purpur abweicht;

2. ein Grün von der Wellenlänge etwa 505 $\mu\mu$;

3. ein Blau von der Wellenlänge etwa 470 $\mu\mu$.

Wir fügten in unserer Abhandlung noch hinzu: »Es sind die somit bestimmten Grundempfindungen genau diejenigen Farben, welche Hr. HERING . . . . . als »Ur-Rot«, »Ur-Grün« und »Ur-Blau« bezeichnet.« Hr. HERING nimmt nun mit vollem Rechte an dem Worte »genau« Anstofs, da »Ur-Rot« und »Ur-Grün« komplementär sind, unsere beiden entsprechenden Farben es aber nicht sein können. Es sei hiermit bereitwilligst zugestanden, dafs das HERINGsche »Ur-Rot« von dem Farbentone der von uns bestimmten roten Grundempfindung nach Blau abweicht, und dafs der Wortlaut an der von

tones wahrscheinlich ziemlich genau der grünen, resp. blauen Grundempfindung (im YOUNG-HELMHOLTZschen Sinne) der normalen trichromatischen Farbensysteme entsprechen; 575 $\mu\mu$ ist diejenige Stelle im Spektrum, wo nach der in derselben Untersuchung gemachten Voraussetzung eine gleich starke Auslösung der Rotempfindung und der Grünempfindung statt hat; 670 $\mu\mu$ und 430 $\mu\mu$ entsprechen in ihrer Farbe den »Endstrecken« normaler trichromatischer Systeme, also denjenigen Regionen, in denen sich an den Enden des Spektrums keine Nuancenänderung, sondern nur noch Intensitätsänderung findet. Die Wellenlänge 605 $\mu\mu$ war in der von Hrn. E. BRODHUN und mir über die psychophysische Grundformel ausgeführten Untersuchung[1] benutzt, und es erschien mir wünschenswert, was hinsichtlich der unteren Reizschwelle später noch besonders hervortreten wird, im Anschlufs an diese Arbeit zu bleiben. Die übrigen Wellenlängen sind dann so gewählt, dafs das ganze Spektrum in möglichst gleiche Intervalle zerlegt wird.

Bei den gröfseren Helligkeiten wurde auch am rechten Collimatorrohr vor den Spalt S_2 ein Triplex-Gasbrenner gesetzt. Um die niederen Helligkeiten herzustellen, schalteten wir dann zunächst einen Episkotister zwischen Lampe und Spalt ein, auf den sich mehrere Scheiben mit verschiedenen Ausschnitten aufsetzen liefsen. Dadurch war eine objektiv völlig gleichmäfsige Verdunkelung aller Spektralregionen

Hrn. HERING angegriffenen Stelle nicht so streng formuliert war, als es, besonders mit Rücksicht auf die Wichtigkeit der behandelten Frage, hätte geschehen müssen. Übrigens liegt der Schwerpunkt jeder Abhandlung, welche über eine experimentelle Untersuchung berichtet, nicht in den Schlufsfolgerungen, welche der Verfasser aus den Versuchsergebnissen zieht, sondern in diesen letzteren selbst, und in Bezug hierauf sehen wir den ferneren Urteilen der Sachverständigen, insbesondere aber dem immer noch ausstehenden Urteile des Hrn. HERING in aller Ruhe entgegen.

[1] A. KONIG und E. BRODHUN, *Sitzungsber. der Berliner Akademie.* 26. Juli 1888.

sicher hergestellt.[1] Es zeigte sich aber bald, dafs sich in dieser Art die Intensität auch noch nicht bis zu den der Reizschwelle nahegelegenen Dunkelheiten herabsetzen liefs, und es wurde daher Gebrauch von einem Verfahren gemacht, welches Hr. F. HILLEBRAND[2] in einer ähnlichen Untersuchung, auf die wir unten noch weiter einzugehen haben, benutzte. Die Anordnung ist diejenige, welche in unserer Figur wiedergegeben. An Stelle der Lampe (oder der Lampe und des Episkotisters) wurde ein innen völlig mattschwarzer Pappkasten *ABCD* vorgesetzt, der bei *EF* eine Öffnung hatte, in die eine aus Pappe hergestellte, zur Abhaltung von Nebenlicht geeignet geformte Verlängerung *llll* des Collimators C_2 hineinragte. Im Innern des Kastens stand vertikal eine Glastafel *G*, welche auf der vorderen Seite mit weifsem Papier beklebt und dann mit Magnesiumoxyd überzogen war. Sie wurde beleuchtet durch einen der schon beschriebenen Triplex-Brenner L_2, der, aufserhalb des Pappkastens stehend, sein Licht durch eine zweite, viel kleinere Öffnung *JK* sandte. Der Metallansatz mit der Konvexlinse war an dem Thoncylinder dieser Lampe entfernt und durch eine Drehscheibe mit runden Öffnungen in verschiedenster Gröfse ersetzt; indem diese gewechselt wurden, konnte eine sehr verschiedene Beleuchtung der Tafel *G* hergestellt werden. Diese diente dann als Lichtquelle für den Collimator C_2. Durch besondere, schon von Hrn. C. DIETERICI und mir im Verlaufe unserer oben angeführten Untersuchung angestellte Versuche ist der Nachweis geführt, dafs von der Tafel, d. h. von dem Magnesiumoxyd reflektiertes Licht stets dieselbe Farbe, also gleiche spektrale Zusammensetzung hat, wie das auffallende. Damit

[1] Durch Absorptionsgläser, deren Verdunkelungskoeffizienten für alle benutzten Wellenlängen besonders hätten bestimmt werden müssen, wäre dieses nur in viel ungenauerer und zeitraubenderer Weise möglich gewesen.

[2] F. HILLEBRAND, *Sitzungsber. der Wiener Akad.* Bd. 97. Abt. III. Sitzung vom 21. Februar 1889.

nun auch immer dieselbe Stelle der Tafel ihr Licht durch den Spalt S_2 sandte, war der Kasten *ABCD* samt der Lampe L_2 auf einem grofsen Brette *abcd* befestigt, und dieses, auf einer Glastafel leicht verschiebbar, wurde vermittelst besonderer Visiervorkehrungen zum Collimatorrohre C_2 stets in dieselbe relative Lage gebracht.

Um alles die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigende Nebenlicht abzuhalten, war der Spektralapparat mit einem völlig undurchsichtigen Tuche überdeckt, und der Beobachter safs in einem besonderen, durch schwarze Vorhänge nach allen Seiten abgegrenzten Raume, in den nur das vordere Ende des Okularrohres *O* hineinragte, und aus dem er durch einen schmalen, an seine Kleider enganschliefsenden Schlitz den Arm hinausstrecken konnte, um die Mikrometerschraube des Spaltes S_2 zu drehen. Auf diese Vorsichtsmafsregeln mufste besonders bei den niederen Intensitäten und der Bestimmung der unteren Reizschwellen grofses Gewicht gelegt werden.

Die Ablesungen an der Mikrometerschraube geschahen stets von einem Gehülfen, so dafs der Beobachter, d. h. der die Gleichheit der Helligkeiten Schätzende über seine Einstellungen vor der Beendigung einer Versuchsreihe nichts erfuhr.

§ 3. Methode der Untersuchung.

Die experimentelle Bestimmung der Helligkeitsverteilung im Spektrum kann in zwei Methoden ausgeführt werden:

Erste Methode. Man läfst, während der Collimator C_2 die den verschiedenen Spektralregionen entsprechenden Stellungen einnimmt, die Breite seines Spaltes S_2 unverändert. Die Herstellung gleicher Helligkeit geschieht vermittels des Spaltes S_1, dessen Breite dann in gewisser Beziehung ein Mafs für die Helligkeit der verschiedenen Spektrallichter ist. Nimmt man das Spektrum als Abscissenaxe, die Spaltbreiten von

S_1 als Ordinaten, so erhält man eine Kurve, die an den Enden des Spektrums in Null übergeht und am höchsten da ist, wo die Helligkeit am gröfsten. Diese Kurve wollen wir die »Kurve der Helligkeit« nennen. Während der Beobachter das Spektrum durchgeht, hat er verschiedene Helligkeiten (vom Maximum bis Null) vor sich.

Eine solche Kurve hat aber geringen Wert, denn ihre Gültigkeit beschränkt sich nicht nur auf ein ganz bestimmtes Spektrum, sondern auch auf die gerade benutzte (von dem Spalt S_1 herrührende) Vergleichsfarbe.

Ändert man die objektive Intensität des untersuchten Spektrums gleichmäfsig an allen Stellen, etwa durch Änderung von S_2, so erhält man jetzt eine Kurve, deren Ordinaten denen der ersten nicht proportional sind; denn das zwischen der konstanten Vergleichsfarbe und den mit ihr verglichenen Farben bestehende PURKINJEsche Phänomen bewirkt eine im Verlaufe des Spektrums sich stetig ändernde Reduktion der Ordinaten.

Aus demselben Grunde ist eine Umrechnung der Kurve etwa von dem benutzten Dispersionsspektrum auf das Interferenzspektrum unmöglich.

Läfst man aber auch das untersuchte Spektrum unverändert und nimmt nur eine andere Farbe zur Vergleichsfarbe, also zur Ausfüllung des rechten Halbkreises, so erhält man infolge des PURKINJEschen Phänomens ebenfalls andere Spaltbreiten von S_1; die Kurve der Helligkeit hat also auch dann schon einen anderen Verlauf. Das, was wir oben über das PURKINJEsche Phänomen erfahren haben, läfst uns leicht erkennen, wie sie sich verändert hat. Ist die zweite Vergleichsfarbe von gröfserer Wellenlänge als die erste, so werden bei gleicher Höhe des natürlich stets an derselben Stelle bleibenden Maximums alle übrigen Ordinaten gröfser sein. Von dem Maximum aus wird die Kurve erst geringere, dann stärkere Neigung nach den Enden des Spektrums hin

haben; stets bleibt sie aber oberhalb der zuerst erhaltenen. Nimmt man Licht von kürzerer Wellenlänge zum Vergleich, so ist die Abweichung die umgekehrte.

Unsere bisherigen Kenntnisse über den quantitativen Verlauf des PURKINJEschen Phänomens sind aber noch viel zu gering, als dafs wir solche Umgestaltungen der Kurve auch nur einigermafsen genau vorher übersehen könnten.

Selbst wenn es für das Vorhandensein des PURKINJEschen Phänomens eine obere Grenze geben sollte, so wird man doch niemals bei dieser Art der Helligkeitsbestimmung gänzlich von der Einwirkung desselben frei sein. Denn liegt auch in dem mittleren Teile die Helligkeit des zu messenden Spektrums oberhalb jener Grenze, die Enden werden doch stets darunter bleiben und ihre Helligkeitsschätzung wird dem Einflufs des PURKINJEschen Phänomens unterworfen sein. Am roten Ende des Spektrums, wo auf einer gröfseren Strecke (von cca. 655 $\mu\mu$ an) für normale trichromatische Augen keine Nuancen-, sondern nur Intensitätsunterschiede vorhanden sind, wäre freilich bei Spektren von so hoher Intensität, dafs der Beginn dieser Endstrecke oberhalb jener Grenze liegt, dieser Nachteil der Methode nicht vorhanden.

Nach dieser Methode sind, wie wir oben schon gesehen, die FRAUNHOFERschen Bestimmungen gemacht. Auch Hr. BRODHUN hat sie benutzt, indem er die Intensität des untersuchten Spektrums so hoch wählte, dafs er glaubte, an dem roten Ende vom PURKINJEschen Phänomen frei zu sein. Für das blaue Ende wandte er einen besonderen, freilich nicht einwandfreien Kunstgriff an, wegen dessen auf die Originalabhandlung verwiesen sei.

Die hier erwähnten Nachteile dieser Methode veranlafsten uns, ein anderes Verfahren einzuschlagen, welches zwar durchaus nicht ohne praktische Mängel, aber doch in mancher Beziehung vorzuziehen ist. Es wurde u. a. schon im DONDERSschen Laboratorium bei den dort ausgeführten Helligkeitsbestimmungen benutzt.

Zweite Methode. Die Spaltbreite von S_1 bleibt unverändert. Der Beobachter sieht dann das in seiner Farbe unveränderte Feld auch stets in konstanter Helligkeit und stellt bei den verschiedenen Spektralfarben diese Helligkeit her. Da man den Spalt S_2 nicht allzusehr verbreitern kann, ohne die Reinheit des Spektrums zu sehr zu beeinträchtigen, so mufs während einer das ganze Spektrum umfassenden Beobachtungsreihe die Beleuchtung von S_2 so geändert werden, dafs man stets nur mäfsige Spaltbreiten benutzt. Würde also beim Übergang zu dunkleren Teilen des Spektrums der Spalt zu breit, so geht man, falls der Kasten $A\,B\,C\,D$ benutzt wird, zu gröfseren Löchern auf der Drehscheibe vor der Lampe über, oder, falls der Episkotister benutzt wird, zu einer Scheibe desselben mit gröfserem Ausschnitt, bezw. man läfst ihn ganz fort u. s. w. Die Änderung der Beleuchtungsstärke, die dadurch eintritt, war durch eine sehr grofse Anzahl von Versuchen so genau wie möglich bestimmt, und die so gewonnenen Reduktionskoeffizienten dienten zur Berechnung ideeller Spaltbreiten. Die Ungenauigkeiten, welche durch solche Umrechnungen in die nachfolgenden Beobachtungsangaben hineingekommen sind, erachte ich im allgemeinen wohl für gröfser als diejenigen, welche mit der Schätzung gleicher Helligkeit verschiedener Farben verbunden sind.[1] Sie beziehen sich aber mit wenigen Ausnahmen nur auf die Enden des Spektrums, beeinflufsen daher kaum den wesentlichen Charakter der erhaltenen Kurven. Zeichnen wir jetzt die (zum Teil ideellen) Spaltbreiten von S_2 in derselben Weise auf wie soeben diejenigen von S_1, so liegen die Maxima an den Enden; die Kurve ist dort, theoretisch genommen, unendlich hoch; ihr Minimum liegt in der

[1] Bei der in Aussicht stehenden Wiederaufnahme dieser Untersuchung mit einem neuen Apparat sollen derartige grofse Intensitätsänderungen durch Kreuzung Nicolscher Prismen erzielt werden.

hellsten Stelle des Spektrums. Wir wollen sie als »Kurve gleichwertiger Spaltbreiten« bezeichnen.

Gehen wir nun von einem Spektrum zu einem anderen über und behalten zunächst das konstante Vergleichslicht bei, so können wir die Kurve des neuen Spektrums ohne weiteres berechnen, wenn wir nur die objektiven, relativen Intensitätsverhältnisse der beiden Spektren kennen. Diese sind aber in den meisten Fällen mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Geht man z. B. von einem Dispersionsspektrum zum Interferenzspektrum derselben Lichtquelle über, so hat man die Ordinaten der »Kurve gleichwertiger Spaltbreiten« mit Koeffizienten zu multiplizieren, welche vom roten Ende des Spektrums bis zum violetten stetig abnehmen. Die erforderlichen Koeffizienten besagen eben nur, auf welchen Bruchteil man den Spalt zu reduzieren hat, um dieselbe Menge Licht durchzulassen. Man kann in solcher Weise auch übergehen zu einem idealen Spektrum, welches in seiner ganzen Ausdehnung einer gleichmäfsigen Verteilung der Energie entspricht. Wir werden weiter unten in § 9 eine derartige Umrechnung ausführen.

Ersetzt man die Erleuchtung des rechten, bisher als konstant gedachten Feldes zunächst durch eine andere Farbe von derselben Helligkeit, so ist sofort ersichtlich, dafs hierdurch die Kurve ungeändert bleibt. Geht man aber zu einer anderen Helligkeit über, so ändert die Kurve ihre Gestalt, und zwar wird infolge des PURKINJEschen Phänomens beim Übergang zu einer gröfseren Helligkeit die Zunahme ihrer Ordinaten nach dem roten Ende hin geringer sein als nach dem blauen Ende, und umgekehrt. Wir werden aus den Beobachtungen ersehen, dafs hierdurch sogar die Lage des Minimums verschoben werden kann. Die Abweichung von einer proportionalen Änderung der Ordinaten giebt uns dann einen Ausdruck für die Stärke des PURKINJEschen Phänomens zwischen zwei beliebigen Wellenlängen.

Es unterliegt demnach wohl keinem Zweifel, dafs die experimentelle Bestimmung von »Kurven gleichwertiger Spaltbreiten« einen gröfseren Wert hat als von »Kurven der Helligkeit«. Sie hat für das betreffende Individuum sogar einen objektiven Wert, sobald man nur die Helligkeit des jedesmaligen konstant gehaltenen Vergleichsfeldes in einem rekonstruierbaren Mafse ausdrückt. Dieses ist in der vorliegenden Arbeit durch Benutzung der schon oben erwähnten, von Hrn. E. BRODHUN und mir zuerst eingeführten Helligkeitseinheit geschehen.

Die experimentelle Bestimmung von »Kurven gleichwertiger Spaltbreiten« hat eine gewisse Beschränkung dadurch, dafs sehr oft die vorhandenen Lichtquellen nicht ausreichen, um die als Vergleich gewählte Helligkeit auch nur annähernd bis an das Ende des Spektrums herzustellen. Einzelne der im folgenden angegebenen Beobachtungsreihen für gröfsere Helligkeiten erstrecken sich daher nicht auf alle sonst verglichenen Wellenlängen des Spektrums.

Ein zweiter Übelstand besteht darin, dafs bei einer graphischen Aufzeichnung infolge des beiderseitigen schnellen Ansteigens der Kurven diese ihre Übersichtlichkeit verlieren, und man sich aus ihnen fast gar keine Vorstellung von dem allgemeinen Eindruck der Helligkeitsverteilung und besonders ihrer Änderung machen kann. Dieser Nachteil der Methode läfst sich aber leicht beseitigen, wenn man die reziproken Werte der Spaltbreiten berechnet und nunmehr diese als Ordinaten über dem benutzten Spektrum als Abscissenaxe aufträgt. Eine solche Art der graphischen Darstellung ist im folgenden stets benutzt, und ich bezeichne die betreffenden Kurven als »Kurven der Helligkeitswerte«, weil die Gröfse der Ordinaten angiebt, welchen Wert die Einheit der Spaltbreite an den verschiedenen Stellen des Spektrums hat, um eine bestimmte Helligkeit zu erzeugen.

Es ist nunmehr noch einiges über die Bestimmung der

Helligkeiten zu sagen, auf welche sich die einzelnen »Kurven der Helligkeitswerte« beziehen. Das theoretisch einzig richtige Verfahren hätte wegen der Farbendifferenz zwischen Spektrallicht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ und dem Licht des schmelzenden Platins darin bestanden, die Helligkeit des rechten Feldes für jede Kurve in den hier benutzten Einheiten besonders zu bestimmen, und zwar bei jeder der untersuchten Personen. Dieses ist aber, weil die vorliegende Arbeit doch nur einen, das ganze Gebiet zwar umfassenden, aber wegen der unzulänglichen Apparate keineswegs abschliefsenden Charakter trägt, nicht streng befolgt worden, sondern es ist die Helligkeitsvergleichung des monochromatisch erleuchteten rechten Feldes mit dem weifsen Lichte nur bei einer der benutzten Intensitäten, und zwar auch nur von Hrn. R. RITTER und mir, ausgeführt worden. Es hatte dieses weifse Licht auch nicht einmal genau die Farbe des Lichtes der SIEMENSschen Platinlampe, auf die sich unsere Helligkeitseinheit bezieht; es diente vielmehr als Vergleichslicht die Benzinlampe eines WEBERschen Photometers, welches nach einigen Umgestaltungen, auf die wir nicht näher einzugehen brauchen, bei dieser Vergleichung in der Art benutzt wurde, dafs es in den Dunkelraum dicht neben das Okularrohr *O* unseres Apparates gestellt wurde, und der Beobachter, sein Auge schnell von einem Okular zum anderen bringend, den rechten Halbkreis im Spektralapparat mit dem Spiegelbild der von der Benzinlampe erleuchteten Milchglasplatte des WEBERschen Photometers verglich. Solche Vergleichungen besitzen zwar geringere Genauigkeit, als wenn die Felder unmittelbar aneinander grenzen, aber die Unsicherheit ist doch nicht so grofs, wie man von vornherein glauben sollte.

Hinsichtlich der Angabe der benutzten Helligkeiten ist noch näher auf den schon erwähnten Umstand einzugehen, dafs die wirkliche Vergleichung des rechten Halbkreises mit dem weifsen in der Helligkeitseinheit enthaltenen Lichte

nur bei einer, zwar ziemlich hohen Intensität ausgeführt worden ist.

In dem folgenden ist die niedrigste benutzte Intensität, welche bei Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$, wie wir später genauer sehen werden, etwa 4 bis 9 mal (objektiv) so hell war wie die untere Reizschwelle, mit A bezeichnet, und von dieser Intensität an sind nach aufwärts zuerst zweimal in Stufen von 16facher, dann aber stets von 4facher Vervielfältigung steigend, die Bezeichnungen B, $C \ldots . H$ benutzt, so dafs wir folgende Verhältnisse der Helligkeitsstufen erhalten:

$$
\begin{array}{rrrrrrrr}
H = 4G = & 16F = & 64E = & 256D = & 1024C = & 16384B = & 262144A \\
G = & 4F = & 16E = & 64D = & 256C = & 4096B = & 65536A \\
F = & 4E = & 16D = & 64C = & 1024B = & 16384A \\
E = & 4D = & 16C = & 256B = & 4096A \\
D = & 4C = & 64B = & 1024A \\
C = & 16B = & 256A \\
B = & 16A
\end{array}
$$

Die Helligkeitsbestimmung wurde von Hrn. RITTER und mir bei der Intensität F ausgeführt, und von dieser wurden dann nach oben und unten die angegebenen Stufen durch entsprechende Änderung der objektiven Intensität des rechten Halbkreises vermittels Absorptionsgläser und Änderung der Breite von S_2 hergestellt.

Für die Intensität F fand sich bei mir eine Helligkeit von 36,9, bei Hrn. R. RITTER eine solche von 54,9 unserer Einheiten, sie lag also oberhalb derjenigen Helligkeit, welche Hr. E. BRODHUN für die Nachweisbarkeit des PURKINJEschen Phänomens gefunden zu haben glaubte.

Bestände zwischen dem grünen monochromatischen Lichte und dem mit ihm verglichenen weifsen Lichte kein PURKINJEsches Phänomen, so ergäbe dieses Verfahren dieselben Vergleichsintensitäten wie bei einer direkten Bestimmung jeder Stufe. Da dieses aber nicht der Fall, so geht das PURKINJEsche Phänomen auch in unsere Helligkeitsangaben ein; es hindert

dieser Umstand aber keineswegs die genaue Reproduzierbarkeit der von uns benutzten Helligkeiten.

Dafs bei Hrn. RITTER und mir sich so verschiedene Werte für dieselbe Helligkeitsstufe F, die doch bei uns beiden durch dieselbe monochromatische Erleuchtung gegeben war, fanden, folgt ohne weiteres aus unseren verschieden gestalteten Kurven der Helligkeitswerte für diese Stufe. Bei Hrn. RITTER liegt das Maximum der Kurve viel näher an der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ als bei mir, und es wird ihm daher Licht dieser Wellenlänge, bezogen auf weifses Licht, auch relativ heller erscheinen. Aus dem Verhältnis der gesamten von der Kurve und der Abscissenaxe umschlossenen Fläche zu der Höhe der Ordinate bei 535 $\mu\mu$, ergiebt sich dieses Verhältnis zu 1,83, während wir experimentell erhielten $\frac{54.9}{36.9} = 1.49$. Die Berechnung setzt aber erstens voraus, dafs die Benzinlampe und der Triplex-Gasbrenner Licht von derselben Farbe aussenden, und dafs zweitens der Helligkeitswert einer Mischung gleich der Summe der Helligkeitswerte der Komponenten. Ersteres ist nun ohne Zweifel nicht genau der Fall, und gegen die Berechtigung der zweiten Voraussetzung bestehen auch manche Bedenken, worauf wir aber hier nicht näher eingehen wollen.

Mit den experimentell gewonnenen Werten für F wurden dann die in der folgenden Tabelle aufgeführten Helligkeiten in der angegebenen Stufenfolge berechnet.

Bei Frl. ELSE KÖTTGEN und Hrn. E. BRODHUN, wo nur bei den Helligkeitsstufen H und A Bestimmungen der Helligkeitswerte ausgeführt wurden, habe ich die absoluten Beträge der Helligkeiten durch Benutzung der von den Kurven und der Abscissenaxe umschlossenen Flächen unter Zugrundelegung meines Wertes für die Helligkeit H berechnet. Ich benutzte die Helligkeitsstufe H, weil diese der experimentell bestimmten Helligkeitsstufe F viel näher liegt als die Helligkeitsstufe A,

und ich schlofs die Rechnung an meine experimentelle Bestimmung an, weil meine Verteilung der Helligkeitswerte im Spektrum viel mehr mit derjenigen von Frl. ELSE KÖTTGEN und Hrn. E. BRODHUN übereinstimmte, wie die des Hrn. RITTER, dessen Beobachtung sonst der meinigen wegen der gröfseren Sicherheit in der Helligkeitsabschätzung vorzuziehen gewesen wäre.

Aufser den schon genannten Helligkeitsstufen ist bei sämtlichen vier Beobachtern noch eine Helligkeitsstufe S in der Tabelle angegeben, welche der unteren Reizschwelle entspricht, und auf die wir in § 8 noch weiter zurückkommen werden.

In der Spalte für Hrn. RITTER sind die drei hellsten Stufen durch eine Klammer zusammengefafst, weil sie dieselbe Verteilung der Helligkeitswerte im Spektrum ergeben.

Tabelle der Helligkeitsstufen.

Bezeichnung der Helligkeitsstufen	Helligkeitseinheiten			
	Trichromatische Systeme		Dichromatische Systeme	
	A. KÖNIG	ELSE KÖTTGEN	»Grünblind« E. BRODHUN	»Rotblind« R. RITTER
H	590.4	608.1	671.7	878.4
G	147.6	—	—	219.6
F	36.9	—	—	54.9
E	9.22	—	—	13.7
D	2.30	—	—	3.43
C	0.575	—	—	0.857
B	0.0360	—	—	0.0536
A	0.00225	0.00232	0.00256	0.00335
S	$0.11.A$	$0.34.A$	$0.29.A$	$0.11.A$
	$= 0.00024$	$= 0.00079$	$= 0.00074$	$= 0.00037$

Die Beobachtung in jeder Helligkeitsstufe geschah in der Art, dafs zuerst auch das linke Feld mit Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ erleuchtet wurde, dann ging man in den erwähnten Intervallen bis zu dem einen Ende des Spektrums, kehrte hier um, die gemachten Vergleiche alle wiederholend, und durchlief nun das ganze Spektrum bis zum anderen Ende,

worauf nochmals bis zu 535 $\mu\mu$ zurückgekehrt wurde. Auf diese Weise hatte man 535 $\mu\mu$ dreimal, die Enden des Spektrums einmal und alle übrigen Wellenlängen zweimal eingestellt. Es wurden jedesmal mindestens 10 Einstellungen auf gleiche Helligkeit gemacht, so dafs also infolge des eben geschilderten Hin- und Hergehens bei jeder Wellenlänge 30, resp. 20, resp. 10 Einstellungen zu je einem Mittel vereinigt wurden. Überdies wurde bei unglattem Verlauf der Kurve für die betreffende Helligkeitsstufe die ganze Beobachtungsreihe nochmals wiederholt und dann das Gesamtmittel berechnet.

§ 4. Versuchsergebnisse.

Indem ich jetzt dazu übergehe, auf die erhaltenen Kurven gleichwertiger Spaltbreiten und der Helligkeitswerte näher einzugehen, mufs zunächst einiges über die Genauigkeit der Einstellung auf gleiche Helligkeit gesagt werden. Hr. BRODHUN, der eine grofse Sicherheit in derartigen Helligkeitsschätzungen besitzt, und der in seiner Eigenschaft als Dichromat (»Grünblind«) nach den freilich sehr wenig zahlreichen Erfahrungen, die man auf dem Gebiete der heterochromen Photometrie gemacht hat, hierzu besonders begünstigt ist, giebt in seiner schon oben citierten Dissertation für sich als mittleren Fehler einer Einstellung auf gleiche Helligkeit von Rot und Blau (670 $\mu\mu$ und 480 $\mu\mu$), also von zwei für ihn beinahe maximal verschiedenen Farben 5,8 % an, während bei Gleichheit der Farbe sich für Rot ein Fehler von 3,0 %, für Blau von 3,3 % ergab. Die jetzt von ihm gemachten heterochromen Gleichheitseinstellungen hatten annähernd denselben Grad der Sicherheit. Hr. RITTER, ebenfalls Dichromat (»Rotblind«), hat zwar nicht dieselbe Sicherheit in der Einstellung wie Hr. BRODHUN, übertrifft aber mich, den Trichromaten, bedeutend. Dafs im allgemeinen Trichromaten den Dichromaten in solchen Helligkeitsschätzungen nachstehen, dürfte aber wiederum etwas zweifelhaft werden durch die Sicherheit, mit der

Frl. ELSE KÖTTGEN die Einstellungen machte, nachdem sie sich durch einige orientierende Versuchsreihen an solche Beobachtungen gewöhnt hatte.

Es ist oben schon erwähnt (S. 26), dafs die Umrechnung der verschiedenen Beleuchtungen des Spaltes S_2 aufeinander mit gröfseren Fehlern verbunden ist, als diejenigen sind, welche durch die Unsicherheit der Schätzung auf gleiche Helligkeit entstehen.

Eine Abhängigkeit der mittleren Einstellungsfehler von der Helligkeitsstufe liefs sich nicht bemerken. Die gröfsere Unsicherheit, welche bei der isochromen Photometrie in der Beurteilung der Helligkeit mit abnehmender Intensität auftritt, wird hier dadurch ausgeglichen, dafs gleichzeitig die Farbendifferenzen immer mehr verschwinden, bis wir bei der Stufe A gröfstenteils völlig gleichgefärbte Felder in Bezug auf ihre Helligkeit miteinander vergleichen.

In den nachfolgenden Tabellen sind überall da, wo keine Farbenunterschiede bei der Vergleichung zu bemerken waren, *liegende Ziffern* benutzt worden. Die Hrn. RITTER und BRODHUN konnten manchmal bei den Wellenlängen 650 $\mu\mu$ und 670 $\mu\mu$ einen Farbenunterschied gegen Licht von 535 $\mu\mu$ wahrnehmen; manchmal war es aber auch trotz der angestrengtesten Aufmerksamkeit nicht möglich.

Die in den Tabellen angegebenen Werte sind in der Art reduziert, dafs bei jeder Helligkeitsstufe die zur Gleichheit bei Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ erforderliche Spaltbreite gleich 1 gesetzt ist. (Die Beziehung der verschiedenen Helligkeitsstufen zueinander ergeben die auf S. 30 aufgeführten Zahlen.) Bei der Umrechnung auf Helligkeitswerte ergiebt sich dann die völlig analoge Reduktion ganz von selbst.

Hierbei mufs sich das PURKINJEsche Phänomen darin zeigen, dafs die gleichwertigen Spaltbreiten mit abnehmender Helligkeit, also in jeder horizontalen Reihe von links nach rechts für jede Wellenlänge, die gröfser ist als diejenige des

Vergleichslichtes (535 $\mu\mu$), zunehmen, für die kleineren Wellenlängen aber abnehmen. Bei den Helligkeitswerten mufs der Verlauf der umgekehrte sein.

Wie eine Durchsicht der nachfolgenden Tabellen nun ergiebt, ist dieses mit geringen Ausnahmen auch stets der Fall. Die wenigen Zahlen, welche von dieser Regel abweichen, sind durch ein beigesetztes Sternchen (*) besonders kenntlich gemacht. Die am violetten Ende des Spektrums bei mir vorkommenden Abweichungen könnten von dem im Violett enthaltenen Rot herrühren. Bei einer Wiederholung der Versuche mufs daher besonders auf die Helligkeitswerte im Violett geachtet werden. Vielleicht kann man aus dem Verhalten derselben einen Schlufs auf die einfache oder zusammengesetzte Natur des Violett ziehen.

A. König.

Normales trichromatisches Farbensystem.

Wellenlänge	Gleichwertige Spaltbreiten								
	H	*G*	*F*	*E*	*D*	*C*	*B*	*A*	*S*
670 $\mu\mu$	1.17	1.23	1.403	1.955	4.560	14.52	[29.08]	189.0	296.1
650 »	0.420	0.547	0.667	0.991	1.948	5.978	13.86	87.57	178.3
625 »	0.289	0.307	0.392	0.497	1.004	2.933	6.202	20.55	34.78
605 »	0.274	0.289	0.321	0.451	0.869	2.073	4.291	8.600	12.12
590 »	0.330	0.346	0.376	0.523	0.787	1.863	2.747	*4.287*	5.656
575 »	0.424	0.459*	0.449	0.568	0.868	1.421	1.679	*1.998*	2.761
555 »	0.590	0.603	0.621	0.702	0.876	1.037	*1.096*	*1.232*	1.402
535 »	*1.—*	*1.*	*1.—*	*1.*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	1.—
520 »	1.805	1.77	1.764	1.707	1.396	*1.162*	*1.121*	*1.088*	1.071
505 »	4.457	4.06	3.748	2.779	2.304	1.809	*1.590*	*1.577*	1.539
490 »	10.06	9.53	8.91	7.971	4.934	3.332	*3.057*	*2.996*	2.342
470 »	—	26.65	22.95	20.71	11.033	7.748	*7.220*	*6.486*	5.974
450 »	—	—	62.88	57.28	40.67	24.23	*20.95*	*21.51**	19.21
430 »	—	—	—	150.8	137.9	119.2	85.90	*115.4**	131.6*

A. König.

Normales trichromatisches Farbensystem.

Wellenlängen	Helligkeitswerte								
	H	*G*	*F*	*E*	*D*	*C*	*B*	*A*	*S*
670 $\mu\mu$	0.855	0.813	0.713	0.511	0.219	0.0689	[0.0344]	0.00529	0.00338
650 »	2.381	1.828	1.499	1.009	0.513	0.167	0.0722	0.0114	0.00561
625 »	3.460	3.257	2.551	2.012	0.996	0.341	0.161	0.0487	0.0288
605 »	3.650	3.460	3.115	2.217	1.151	0.482	0.233	0.116	0.0825
590 »	3.030	2.890	2.660	1.912	1.271	0.537	0.364	*0.233*	0.177
575 »	2.358	2.179*	2.227	1.761	1.152	0.704	0.596	*0.501*	0.362
555 »	1.695	1.658	1.610	1.425	1.142	0.964	*0.913*	*0.812*	0.713
535 »	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	1.—
520 »	0.554	0.565	0.567	0.586	0.716	*0.859*	*0.892*	*0.919*	0.934
505 »	0.224	0.246	0.267	0.360	0.434	0.553	*0.629*	*0.634*	0.650
490 »	0.0994	0.105	0.112	0.125	0.203	0.300	*0.327*	*0.334*	0.427
470 »	—	0.0375	0.0436	0.0483	0.0906	0.129	*0.138*	*0.154*	0.167
450 »	—	—	0.0159	0.0175	0.0246	0.0413	*0.0477*	*0.0466**	0.0521
430 »	—	—	—	0.00663	0.00725	0.00839	0.0116	*0.00867**	0.00760*

Else Köttgen.

Normales trichromatisches Farbensystem.

Wellenlänge	Gleichwertige Spaltbreiten		Helligkeitswerte	
	H	*A*	*H*	*A*
670 $\mu\mu$	0.893	88.56	1.120	0.0113
650 »	0.468	39.46	2.137	0.0253
625 »	0.293	17.09	3.413	0.0630
605 »	0.308	*6.837*	3.247	*0.146*
590 »	0.378	*3.131*	2.645	*0.319*
575 »	0.520	*2.088*	1.923	*0.479*
555 »	0.720	*1.155*	1.389	*0.866*
535 »	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*
520 »	1.808	*1.051*	0.553	*0.951*
505 »	4.00	*1.354*	0.250	*0.739*
490 »	10.88	*2.594*	0.092	*0.386*
470 »	—	*5.386*	—	*0.186*
450 »	—	*16.68*	—	*0.0600*
430 »	—	*83.33*	—	*0.0120*

E. Brodhun.

Dichromatisches Farbensystem (»Grünblind«).

Wellenlänge	Gleichwertige Spaltbreiten		Helligkeitswerte	
	H	*A*	*H*	*A*
670 μμ	1.852	141.3	0.540	0.00708
650 »	0.731	59.1	1.368	0.0169
625 »	0.380	*19.27*	2.630	*0.0519*
605 »	0.333	*7.153*	3.003	*0.140*
590 »	0.394	*3.747*	2.539	*0.267*
575 »	0.458	*1.892*	2.183	*0.529*
555 »	0.602	*1.219*	1.661	*0.820*
535 »	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*
520 »	1.727	*1.035*	0.756	*0.966*
505 »	4.437	*1.507*	0.225	*0.664*
490 »	11.82	*2.499*	0.0846	*0.400*
470 »	—	*6.188*	—	*0.162*
450 »	—	*21.01*	—	*0.0476*
430 »	—	*102.5*	—	*0.00975*

R. Ritter.

Dichromatisches Farbensystem (»Rotblind«).

Wellenlänge	Gleichwertige Spaltbreiten						
	FGH	*E*	*D*	*C*	*B*	*A*	*S*
670 μμ	19.81	27.06	34.54	83.76	192.6	291.1	271.8*
650 »	6.46	9.184	12.13	19.47	79.00	110.6	121.2
625 »	2.03	2.532	3.613	7.801	19.75	*19.84*	22.35
605 »	1.004	1.245	1.763	3.413	6.894	*7.15*	13.85
590 »	0.720	0.797	1.056	2.102	3.670	*4.28*	6.07
575 »	0.619	0.685	0.790	1.553	2.180	*2.283*	2.30
555 »	0.708	0.714	0.754	1.133	*1.298*	*1.291**	1.24*
535 »	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	1.—
520 »	1.650	1.535	1.446	*1.107*	*1.088*	*1.046*	1.01
505 »	3.19	2.860	2.631	1.717	*1.455*	*1.318*	1.85*
490 »	6.57	6.310	5.294	3.197	2.605	*2.320*	2.16
470 »	19.59	15.84	13.68	7.693	*6.060*	*5.108*	7.23*
450 »	75.10	57.97	46.02	37.83	*22.44*	*15.39*	13.58
430 »	—	273.4	224.84	182.7	122.00	*91.39*	89.50

R. RITTER.

Dichromatisches Farbensystem (»Rotblind«).

Wellenlänge	Helligkeitswerte						
	FGH	*E*	*D*	*C*	*B*	*A*	*S*
670 $\mu\mu$	0.0518	0.0370	0.0289	0.0119	0.00519	0.00343	0.00368*
650 »	0.155	0.109	0.0824	0.0513	0.0127	0.00904	0.00825
625 »	0.493	0.395	0.277	0.128	0.0506	*0.0504*	0.0447
605 »	0.996	0.803	0.567	0.293	0.145	*0.139*	0.0722
590 »	1.389	1.255	0.947	0.476	0.273	*0.234*	0.165
575 »	1.615	1.460	1.266	0.644	0.459	*0.438*	0.435
555 »	1.412	1.401	1.326	0.882	*0.770*	*0.774**	0.806*
535 »	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	*1.—*	1.—
520 »	0.606	0.651	0.691	*0.903*	*0.919*	*0.956*	0.990
505 »	0.314	0.350	0.380	0.582	*0.687*	*0.759*	0.541*
490 »	0.152	0.158	0.189	0.313	*0.384*	*0.431*	0.463
470 »	0.0510	0.0631	0.0731	0.130	*0.165*	*0.196*	0.138*
450 »	0.0133	0.0172	0.0217	0.0264	*0.0446*	*0.0650*	0.0736
430 »	—	0.00366	0.00445	0.00547	0.00820	*0.0109*	0.0112

Auf Tafel III sind meine Kurven der Helligkeitswerte (mit Ausnahme der Stufe *S*) in der angegebenen Art graphisch dargestellt. Aufser denjenigen Wellenlängen, bei welchen Vergleichungen gemacht sind, habe ich auf der Abscissenaxe, der leichteren Orientierung halber, auch noch die hauptsächlichsten FRAUNHOFERschen Linien eingetragen. — Dafs alle Kurven bei 535 $\mu\mu$ dieselbe Ordinate haben, beruht auf der erwähnten rechnerischen Festsetzung; dafs sie sich aber hier alle schneiden, und ihre Reihenfolge, nach der Gröfse der Ordinaten geordnet, auf der langwelligeren Hälfte des Spektrums überall die umgekehrte ist, wie auf der kurzwelligeren, ist der graphische Ausdruck des PURKINJEschen Phänomens. Nur die der Helligkeitsstufe *F* entsprechende Kurve macht bei 575 $\mu\mu$ eine Ausnahme, die aber ohne Zweifel Beobachtungsfehler ist; die übrigen in der Tabelle angemerkten Abweichungen von der Regel des PURKINJEschen Phänomens treten bei dem hier gewählten Mafsstabe der Zeichnung gar nicht hervor.

Die Helligkeitskurven von Frl. ELSE KÖTTGEN und Hrn. E. BRODHUN sind in den Tafeln V und VI aufgenommen, wo behufs einer weiter unten in §§ 6 und 7 angestellten Vergleichung eine gröfsere Zahl von Kurven gleicher Helligkeitsstufen eingetragen ist. Die Kurven beider sind meinen Kurven der gleichen Helligkeitsstufe sehr ähnlich.

Auf Tafel IV sind Hrn. RITTERs Kurven der Helligkeitswerte (ebenfalls mit Ausnahme von *S*) dargestellt. Seine Kurve für die Helligkeitsstufe *A* ist mit der meinigen beinahe identisch. Die Abweichung unserer Kurven nimmt zu mit der Zunahme der Helligkeit. Das PURKINJEsche Phänomen tritt auch hier regelmäfsig auf. Der Mafsstab der Zeichnung läfst die einzige Ausnahme (555 $\mu\mu$ bei der Helligkeitsstufe *A*) nicht sichtbar werden. Wie früher schon erwähnt, war bei Hrn. RITTER ein PURKINJEsches Phänomen zwischen den Helligkeitsstufen *F*, *G* und *H* nicht mehr nachzuweisen; wenn es hier thatsächlich noch bestehen sollte, so wird es durch die Schätzungsunsicherheit verdeckt. Ich habe daher die Mittelwerte der bei diesen drei Stufen erhaltenen Spaltbreiten berechnet und sie als Stufe *F G H* in die Tabellen und Zeichnungen eingeführt.

§ 5. Allgemeine Besprechung der Versuchsergebnisse.

Das PURKINJEsche Phänomen zeigt sich in der Form der hier benutzten Darstellung darin, dafs die Kurven gleichwertiger Spaltbreiten und damit auch die Kurven der Helligkeitswerte mit Änderung der Intensität auch ihre Gestalt ändern. In unserem Dispersionsspektrum des Gaslichtes wandert das Maximum der Kurven der Helligkeitswerte, resp. das Minimum der Kurven gleichwertiger Spaltbreiten, von der niedrigsten bis zur höchsten der benutzten Intensitäten bei mir, Frl. ELSE KÖTTGEN und Hrn. E. BRODHUN von ca. 530 $\mu\mu$ bis ca. 615 $\mu\mu$, bei Hrn. RITTER von 530 $\mu\mu$ bis 570 $\mu\mu$. Die Formänderung geschieht mit zunehmender Intensität anfangs sehr langsam,

dann schneller, darauf aber wieder langsamer und hört endlich vielleicht ganz auf.

Welcher Farbentheorie man auch beistimmt, jedenfalls ist zuzugeben, dafs das, was man Helligkeit nennt, sich (abgesehen von den monochromatischen Farbensystemen) aus mehreren Komponenten zusammensetzt oder wenigstens zusammensetzen könnte.

In der YOUNG-HELMHOLTZschen Farbentheorie müfste man im allgemeinen annehmen, dafs jede der drei Grundempfindungen eine Komponente lieferte, so dafs also die Helligkeit irgend einer Spektralfarbe als homogene lineare Funktion der Grundempfindungen darzustellen ist. In Bezug hierauf sei auf die im folgenden Paragraphen angegebenen Versuche hingewiesen.

Die Gestalt der Kurven, welche die Verteilung der Grundempfindungen im Spektrum angiebt, ist nun nach Untersuchungen, die von Hrn. E. BRODHUN angestellt und von mir veröffentlicht sind,[1] von der Intensität abhängig. Ob hierdurch allein die Formänderung der Kurven der Helligkeitswerte mit wechselnder Intensität zu erklären ist, kann bei dem gegenwärtigen Umfang unserer Kenntnisse nicht entschieden werden. Vielleicht ist es nötig, die in jener linearen Funktion vorkommenden drei Koeffizienten wiederum als drei verschiedene Funktionen der Intensität anzunehmen. Bei Farbensystemen verschiedener Mannigfaltigkeit völlig parallel von denselben Personen hergestellte Helligkeitsgleichungen und Farbengleichungen würden über diesen Punkt allein näheren Aufschlufs geben können. Hrn. E. BRODHUNs Untersuchungen[2] haben es sehr wahrscheinlich gemacht, dafs der Koeffizient für die grüne Grundempfindung, verglichen mit demjenigen der roten Grundempfindung, jedenfalls sehr klein, wenn nicht sogar gleich Null ist.

[1] A. KÖNIG, *Sitzungsber. der Berl. Akademie.* 31. März 1887.

[2] E. BRODHUN, *Beiträge zur Farbenlehre.* Dissert. Berlin 1887.

Nach Hrn. HERINGs Theorie ist die Helligkeit jeder Spektralfarbe gleich der algebraischen Summe der Helligkeiten 1) ihrer weifsen Valenz und 2) ihrer farbigen Valenzen. Diejenigen spektralen Lichter, welche die Empfindung einer der vier Urfarbentöne hervorrufen, haben nur eine farbige Valenz, die übrigen aber zwei. Die »spezifische Helligkeit« dieser farbigen Valenzen ist aber nach Hrn. E. HERINGS[1] und Hrn. F. HILLEBRANDS[2] Untersuchungen für die vier Urfarben durchaus nicht gleich anzunehmen, ja es sollen Grün und Blau sogar einen verdunkelnden Einflufs besitzen, d. h. in der Rechnung wäre ihrer »spezifischen Helligkeit« ein negativer Wert beizulegen.

Die Helligkeit ist also auch hier wieder eine lineare homogene Funktion der Valenzen. Die Funktion enthält aber fünf Glieder, von denen freilich immer mindestens zwei (farbige) gleich Null sind. Da Herr HERING an der Unabhängigkeit der Farbengleichungen von der absoluten Intensität, also an der relativen Verteilung jeder Valenz im Spektrum festhält, so müssen hier die Koeffizienten der einzelnen Glieder als verschiedene Funktionen der absoluten Intensität des Lichtes angenommen werden, da sonst die Helligkeitsverteilung im Spektrum sich nicht mit der absoluten Intensität ändern könnte. Es wäre aber wohl möglich, dafs die Koeffizienten, nach Berücksichtigung des in ihnen enthaltenen Faktors der spezifischen Helligkeit, bei den sich auf die vier Grundfarben beziehenden Gliedern jener homogenen linearen Funktion untereinander gleich, von dem Koeffizienten des die weifse Valenz darstellenden Gliedes aber verschieden sind. In diesem Falle reduziert sich die Gleichung auf folgende zweigliedrige Form

$$\mathfrak{H}_\lambda = \alpha \cdot \mathfrak{W}_\lambda + \beta \cdot \mathfrak{F}_\lambda ,$$

[1] E. HERING, *Pflügers Archiv.* Bd. 49. S. 563. 1891.

[2] F. HILLEBRAND, *Sitzungsber. der Wiener Akad.* XCVIII. Abt. III. Sitzung vom 21. Febr. 1889.

wo α und β zwei verschiedene Funktionen der absoluten Intensität des Lichtes sind, und $\mathfrak{H}_\lambda$ sich auf die gesamte Helligkeit des monochromatischen Lichtes von der Wellenlänge λ, $\mathfrak{W}_\lambda$ auf dessen weifse Valenz und $\mathfrak{F}_\lambda$ auf dessen farbige Valenzen bezieht. Nach der oben gemachten Annahme haben wir dann zu setzen

$$\mathfrak{F}_\lambda = r \,.\, \mathfrak{R}_\lambda + g' \,.\, \mathfrak{G}'_\lambda + g'' \,.\, \mathfrak{G}''_\lambda + b \,.\, \mathfrak{B}_\lambda \,,$$

wo $\mathfrak{R}_\lambda$, $\mathfrak{G}'$, $\mathfrak{G}''$ und $\mathfrak{B}$ die vier farbigen Valenzen und r, g', g'' und b die spezifischen Helligkeiten der vier Grundfarben bezeichnen.

Ich habe nun versucht, die bei Hrn. RITTER und mir erhaltenen Kurven auf ihre Übereinstimmung mit dieser vereinfachten Form der von Hrn. HERING entwickelten Anschauung über das Zusammenwirken der Helligkeitskomponenten zu prüfen.

Wenn man zwei beliebige homogene lineare Funktionen $\mathfrak{M}'$ und $\mathfrak{M}''$ von $\mathfrak{W}_\lambda$ und $\mathfrak{F}_\lambda$ bildet, so ist ersichtlich, dafs man bei geeigneter Bestimmung von $\mathfrak{m}'$ und $\mathfrak{m}''$ stets setzen kann

$$\mathfrak{H}_\lambda = \mathfrak{m}' \,.\, \mathfrak{M}' + \mathfrak{m}'' \,.\, \mathfrak{M}''$$

Ich nahm nun bei mir die für die Helligkeitsstufen *A* und *H*, bei Hrn. RITTER die für die Helligkeitsstufen *A* und *FGH* erhaltenen Kurven als $\mathfrak{M}'$ und $\mathfrak{M}''$, und sah zu, ob sich daraus nach dieser Gleichung die übrigen Kurven bilden liefsen. Es ergab sich nun, dafs dieses für die Kurven gleichwertiger Spaltbreiten durchaus nicht möglich ist, während bei den Kurven der Helligkeitswerte zwar keine genaue Übereinstimmung der Berechnung mit der Beobachtung zu erzielen war, dafs aber selbst die gröfsten vorkommenden Abweichungen innerhalb derjenigen Breite der Unsicherheit unserer Beobachtungen lagen, die bei zufällig gleichgerichteter Einwirkung sämtlicher Fehlerquellen noch zuzugestehen ist. Da ich hoffentlich in einiger Zeit über

besseres Beobachtungsmaterial verfüge, welches dann auch gestattet, von der oben eingeführten vereinfachenden Annahme abzusehen, unterlasse ich es hier, auf die Schlufsfolgerungen einzugehen, die man aus den Ergebnissen dieser Rechnungsversuche über den Energieverbrauch der beim Sehen vor sich gehenden Prozesse ziehen könnte.

§ 6. Die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte bei hoher Intensität.

Wir wollen uns nun zunächst etwas eingehender mit der spektralen Verteilung der Helligkeitswerte bei derjenigen Helligkeitsstufe beschäftigen, wo wenigstens annähernd die obere Grenze der Abhängigkeit von der absoluten Intensität erreicht ist (Stufe *H* resp. *FGH*). Die schon mitgeteilten Bestimmungen ergeben eine ziemlich gute Übereinstimmung der den beiden normalen trichromatischen Farbensystemen zukommenden Kurven sowohl untereinander als auch mit der dem (dichromatischen) »grünblinden« Farbensystem des Hrn. E. Brodhun angehörenden. Frühere von mir angestellte Beobachtungen ähnlicher Art, die ich bis jetzt noch nicht veröffentlicht habe, bewahren mich glücklicherweise davor, aus den jetzigen Beobachtungen einen verallgemeinernden, voreiligen Schlufs zu ziehen; denn sie zeigen, dafs trichromatischen Farbensystemen auch Kurven der Helligkeitswerte eigen sind, die sich in ihrer Gestalt von meiner Kurve und der Frl. Else Köttgen angehörenden wesentlich unterscheiden und Übergangsformen zu derjenigen Kurve der Helligkeitswerte bilden, die dem (dichromatischen) »rotblinden« Farbensystem des Hrn. Ritter zukommt. Die drei von mir vor mehreren Jahren untersuchten Personen, die Hrn. L., M. und Kr., besitzen ein normales trichromatisches Farbensystem; wenigstens zeigen ihre Farbengleichungen unter sich und mit den von mir hergestellten nur unwesentliche Verschiedenheiten, wenn man sie gemeinsam gegenüberstellt den-

jenigen Farbengleichungen, die dem Typus der anomalen trichromatischen Farbensysteme zukommen, wie er von Lord RAYLEIGH und F. C. DONDERS zuerst beobachtet und dann von Hrn. C. DIETERICI und mir eingehender untersucht worden ist. Das Verhältnis der Komponenten in den von ihnen hergestellten Mischungen von Lithium-Rot und Thallium-Grün zu der Farbe von Natrium-Gelb weicht zwar von dem für mich erforderlichen Verhältnis nach derselben Richtung ab, wie es für anomale trichromatische Farbensysteme der Fall; aber die stets hervorgetretene unausgefüllte Kluft zwischen der normalen und der anomalen Gruppe der Trichromaten hatte keiner der drei Herren überschritten, so dafs also auf Grund der DONDERSschen Lithium-Thallium-Probe ihre Zurechnung zu den sogenannten normalen Trichromaten keinem Zweifel unterliegen kann. Die Bestimmungen wurden vor etwa drei Jahren mit demselben Apparate gemacht, den auch Hr. E. BRODHUN bei seinen Helligkeitsvergleichungen benutzte. Wie oben schon erwähnt ist, war die Beschaffenheit des damals benutzten Lichtes und die Dispersion von der jetzigen etwas verschieden; doch es liefsen sich Koefficienten finden, welche mit hier genügender Annäherung eine Reduktion der früheren Beobachtungen auf das jetzige Spektrum gestatteten. Die Helligkeitsvergleichungen erstreckten sich nicht auf das ganze Spektrum, sondern umfafsten nur den für die Gestalt der Kurve charakteristischsten Teil von 650 $\mu\mu$ bis 530 $\mu\mu$; sie geschahen auch nicht bei denselben Wellenlängen wie jetzt. Ich habe aus den damaligen Beobachtungen, die bereits nach unserer jetzigen Methode angestellt wurden, d. h. die Kurven gleichwertiger Spaltbreiten, resp. der Helligkeitswerte ergaben, die Zahlen für die jetzt benutzten Wellenlängen durch graphische Interpolation gewonnen und an ihnen die genannte Reduktion auf das neue Spektrum ausgeführt.

Zu ungefähr derselben Zeit hatte ich Gelegenheit, die

Kurven der Helligkeitswerte an dem rechten dichromatischen, und zwar »rotblinden« Auge des Hrn X., eines in physikalischen Untersuchungen geschulten Beobachters, zu bestimmen. Auch diese Kurve wurde jetzt in völlig analoger Weise wie die soeben besprochenen umgerechnet. Ich lege auf sie besonderen Wert, da das linke, dem rechten ursprünglich völlig gleiche Auge ein Jahr vorher infolge einer Netzhautablösung die Farbenempfindung völlig verloren hatte, also ein pathologisch entstandenes monochromatisches Farbensystem besafs. Auf die hierauf bezüglichen, beide Augen vergleichenden Beobachtungen werde ich weiter unten in § 11 näher eingehen.

Die Helligkeitsstufe, bei der ich damals an diesen vier Personen die Bestimmung der Helligkeitswerte vorgenommen habe, läfst sich freilich nicht genau und sicher auf das jetzt benutzte Einheitsmafs beziehen, doch kann ich sie aus den Angaben meiner Beobachtungsprotokolle bei den Beobachtungen der Hrn. L., M. und Kr. zu etwa 100, bei den Beobachtungen des Herrn X. zu etwa 50 unserer jetzigen Einheiten schätzen. Es würde dieses also ungefähr den Stufen *G* resp. *F* entsprechen.

In der folgenden Tabelle führe ich die erhaltenen Werte auf und wiederhole des Vergleichs halber die an den vier jetzt untersuchten Personen für die Stufe *H* erlangten, oben schon angegebenen Werte.

Wellenlänge	Helligkeitswerte							
	Normale trichromatische Farbensysteme					Dichromatische Farbensysteme		
						»Grünblind«	»Rotblind«	
	A. König	E. Köttgen	L.	M.	Kr.	E. Brodhun	R. Ritter	X
670 $\mu\mu$	0.855	1.120	—	—	—	0.540	0.0518	0.071
650 »	2.381	2.137	1.15	—	0.64	1.368	0.155	0.183
625 »	3.460	3.413	2.06	1.10	1.24	2.630	0.493	0.517
605 »	3.650	3.247	2.56	1.66	1.56	3.003	0.996	0.976
590 »	3.030	2.645	2.38	2.05	1.58	2.539	1.389	1.370
575 »	2.358	1.923	2.00	2.08	1.56	2.183	1.615	1.477
555 »	1.695	1.389	1.50	1.65	1.36	1.661	1.412	1.339
535 »	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—
520 »	0.554	0.553	—	—	—	0.576	0.606	0.700
505 »	0.224	0.250	—	—	—	0.225	0.314	0.492
490 »	0.0994	0.092	—	—	—	0.0846	0.152	0.250

Der Umstand, dafs der Helligkeitswert für Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$, für welches die Absorption in dem Pigment der Macula lutea bei verschiedenen Personen sehr ungleich ist, stets gleich 1 gesetzt, läfst die Kurven verschiedener erscheinen, als sie thatsächlich sind. Ein richtigeres Bild würde entstehen, wenn die von der Abscissenaxe und der Kurve umschlossene Fläche stets gleich gesetzt würde. Ich habe hier davon abgesehen, weil nur ein kleiner Teil der Kurven bis an das Ende des Spektrums verfolgt war; die Reduktion auf gleiche Fläche wäre daher zu unsicher geworden.

Diese Benutzung eines ungeeigneten Mafsstabes tritt in Tafel V die u. a. eine graphische Darstellung dieser Kurven enthält, in noch viel augenfälliger Weise hervor.

Als Resultat können wir also hinstellen, dafs selbst bei sehr ähnlichen, demselben Typus angehörigen Farbensystemen die Kurven der Helligkeitswerte sehr verschieden sein können. Ob auch innerhalb jeder der beiden Gruppen der Dichromaten, also der »Rotblinden« und »Grünblinden«, gröfsere Verschiedenheiten in der Verteilung der Helligkeitswerte vor-

kommen, kann ich aus eigener Beobachtung nicht beurteilen. Ich habe die Kurve der Helligkeitswerte bisher nur bei einem »Grünblinden« und bei zwei »Rotblinden« bestimmt. Bei den beiden letzteren hatte, wie aus der obigen Tabelle hervorgeht, die Kurve ähnlichen Verlauf. — DONDERS [1] hat bei seiner ersten hierauf bezüglichen, nach einer weniger vollkommenen Methode angestellten Beobachtungsreihe einzelne Übergangformen zwischen den beiden Typen gefunden, in der zweiten Reihe jedoch nicht. Soviel ich weifs, hat er die versprochene ausführlichere Veröffentlichung des Beobachtungsmaterials nicht mehr ausgeführt. Ich selbst möchte diese Frage zunächst unentschieden lassen.

Aus der völligen oder angenäherten Gleichheit der Farbengleichungen zweier Personen können wir daher durchaus nicht auf ein ähnliches Verhalten hinsichtlich ihrer heterochromen Helligkeitsgleichungen schliefsen.

Ist, wie wir oben schon erörtert haben, der Helligkeitswert jeder Farbe eine homogene und lineare Funktion der Stärke der Grundempfindungen (gleichviel, welcher Theorie wir uns anschliefsen), so müssen bei zwei hinsichtlich der spektralen Verteilung der Helligkeitswerte verschiedenen Personen, welche aber alle Farbengleichungen gegenseitig anerkennen, entweder die Koefficienten jener Funktion nicht dieselben sein, so dafs also dieselbe Grundempfindung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Helligkeit verschieden ins Gewicht fällt, oder die spektrale Verteilung der Grundempfindungen ist bei beiden Personen nicht dieselbe, dann aber müssen die diese Verteilung darstellenden Kurven bei der einen Person homogene lineare Funktionen derjenigen der anderen Person sein. Soviel ich weifs, sind bisher keine Beobachtungen in der Richtung angestellt, dafs man aus ihnen auf die Richtigkeit der einen oder der anderen

[1] F. C. DONDERS, *Gräfes Archiv.* XXVII (1), S. 196, 1881 — und XXX (1), S. 76. 1884.

dieser beiden Möglichkeiten schliefsen könnte. Wohl aber kann man bereits prüfen, ob jene homogene lineare Abhängigkeit zwischen dem Helligkeitswert und der Stärke der Grundempfindungen besteht; es mufs in diesem Falle nämlich die Kurve der Helligkeitswerte auch den Farbengleichungen genügen. Man braucht also nur von derselben Person bei wenigstens annähernd derselben Helligkeit in einer beliebigen Spektralregion Farbengleichungen und heterochrome Helligkeitsgleichungen herstellen zu lassen. Bezeichnen wir mit den Indices 1, 2 und 3 drei bestimmte Spektralfarben, und schreiben wir eine zwischen diesen herzustellende Farbengleichung in der Form

$$a.\, L_1 + b.\, L_3 = L_2,$$

so müssen L_1, L_2 und L_3 nicht nur durch die Werte der Grundempfindungen, sondern auch durch die Helligkeitswerte ersetzt werden können.

Für die oben bereits erwähnten Hrn. L., M. und Kr. und für mich verfüge ich über derartige Parallelbeobachtungen, welche ich damals aus anderem Gesichtspunkte und daher nicht in einer für den hier vorliegenden Zweck ganz geeigneten Auswahl der Komponenten in den Farbengleichungen angestellt habe. Die Wellenlängen der Mischungskomponenten waren 630 $\mu\mu$ und 540 $\mu\mu$; es wurden Farbengleichungen hergestellt mit Licht von 610 $\mu\mu$, 590 $\mu\mu$ und 570 $\mu\mu$, also im ganzen 12 Farbengleichungen, die jedoch als nicht ganz vollkommen angesehen werden konnten, da geringe Sättigungsunterschiede bestehen blieben.

Da von den Hrn. L., M. und Kr. keine Helligkeitsgleichungen bei der einen Mischungskomponente 540 $\mu\mu$ hergestellt waren, so habe ich hier graphisch interpoliert.

Die Resultate der Berechnung und Vergleichung sind in der folgenden Tabelle eingetragen.

Bei jedem der vier Beobachter enthält die erste Kolumne die beobachteten Helligkeitswerte, wobei hier die Reduktion

auf das jetzt benutzte Spektrum und auf den Helligkeitswert 1 für die Wellenlänge 535 $\mu\mu$ nicht ausgeführt ist; die drei durch Interpolation erhaltenen Werte sind eingeklammert. Die zweite Kolumne enthält die aus den Komponenten berechneten Helligkeitswerte der Mischung; sie müssen, wenn eine homogene lineare Abhängigkeit zwischen Helligkeitswert und der Stärke der Grundempfindungen besteht, gleich dem Helligkeitswert des gleichgefärbten monochromatischen Lichtes sein. Die dritte Kolumne giebt die Differenz: Berechnung minus Beobachtung in Prozenten.

Bei neun Mischungen beträgt diese Differenz 4% und weniger; die übrigen drei weichen um 10%, resp. 11%, resp. 14% ab.

Berücksichtigt man, dafs bei jeder Helligkeitsgleichung ohne weiteres ein Fehler bis zu 5% zuzugestehen ist, dafs hier in jede Berechnung drei derartige Werte eingehen, und dafs endlich die Farbengleichungen auch etwas unsicher waren, so glaube ich, dafs man in diesen drei gröfseren Abweichungen wenigstens keine Widerlegung für das Vorhandensein jener Beziehung sehen darf. Weitere Untersuchungen freilich können erst vollkommene Sicherheit bringen.

Wellenlänge	Helligkeitswerte											
	König			L.			M.			Kr.		
	Beobachtung	Berechnung	Differenz	Beobachtung	Berechnung	Differenz	Beobachtung	Berechnung	Differenz	Beobachtung	Berechnung	Differenz
630 $\mu\mu$	0.92			0.75			0.60			0.61		
610 »	1.17	1.05	—10%	1.00	1.02	+2%	1.00	1.00	0%	1.00	0.89	—11%
590 »	1.00	0.98	— 2%	0.93	0.91	—2%	1.30	1.12	—14%	1.00	0.99	— 1%
570 »	0.74	0.72	— 3%	0.72	0.71	—1%	1.20	1.16	— 3%	0.95	0.97	+ 2%
550 »				0.50			0.91			0.75		
540 »	0.34			(0.39)			(0.67)			(0.60)		
530 »				0.28			0.43			0.47		

§ 7. Die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte bei sehr niedriger Intensität und ihre Beziehung zu angeborenen monochromatischen Farbensystemen.

Die PURKINJEsche Beobachtung, dafs mit abnehmender Helligkeit die Farbenunterschiede geringer werden, und dafs wir bei sehr schwacher Beleuchtung in der uns umgebenden Aufsenwelt nur noch Helligkeitsunterschiede, aber keinerlei Farbenunterschiede mehr wahrnehmen können, wird durch die alltägliche Erfahrung bestätigt. Dafs dieses Verschwinden des Farbeneindruckes vor dem völligen Untersinken unter die Reizschwelle auch bei spektralen Lichtern eintritt, ist viel schwieriger zu beobachten, und es zeigt sich auch, dafs hier das Rot eine Ausnahme macht, indem es wahrscheinlich bis zur unteren Reizschwelle, jedenfalls aber bis in unmittelbare Nähe derselben seine Farbe beibehält.[1] Hr. HERING hat zuerst auf die theoretische Bedeutung dieses Zurücktretens der farbigen Empfindung nachdrücklich hingewiesen, und aus seinem Laboratorium sind denn auch die ersten darauf bezüglichen messenden Versuche hervorgegangen.

Die Lichtintensität, bei der diese Erscheinung überhaupt auftritt, ist so gering, dafs nur ein längere Zeit für völlige Dunkelheit adaptiertes Auge dieselbe wahrnehmen kann.

---

[1] Soviel ich finden kann ist Hr. W. v. BEZOLD der Erste, der darauf bezügliche Beobachtungen veröffentlicht hat. Die mir bekannt gewordene Litteratur über diesen Gegenstand ist die folgende:

W. v. BEZOLD, *Pogg. Ann.* Bd. 150. S. 238. 1873. — *Die Farbenlehre im Hinblick auf Kunst und Kunstgewerbe.* S. 28. Braunschweig. 1874.

C. BOHN, *Pogg. Ann.* Erg.-Bd. 6. S. 400. 1874.

J. v. KRIES, *du Bois' Archiv,* Jahrg. 1878. S. 523. — *Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse.* S. 82. Leipzig. 1882. (Suppl.-Bd. zu *du Bois' Archiv.* Jahrg. 1882.)

F. C. DONDERS, *Gräfes Archiv.* XXVII (1), S. 196. 1881.

H. F. WEBER, *Sitzungsber. der Berl. Akad. vom 9. Juli.* 1887.

Nach Hrn. HERINGS Ansicht ist die Empfindlichkeit eines solchen Auges für die weifsen Valenzen des Lichtes gesteigert, für die farbigen Valenzen aber die normale; infolgedessen kommt bei so geringer absoluter Intensität nur eine Weifs-Empfindung und keine Farben-Empfindung zu Stande. Die Kurve der Helligkeitswerte ist nach dieser Anschauung dann also identisch mit einer Kurve der spektralen Verteilung der weifsen Valenz.

Nach der Theorie der Gegenfarben ist die totale Farbenblindheit durch den Wegfall der farbigen Valenzen des Lichtes zu erklären, und es mufs daher die Kurve der Helligkeitsverteilung im Spektrum eines total Farbenblinden, wie sie zuerst von DONDERS[1] und dann von Hrn. C. DIETERICI und mir[2] bestimmt ist, mit jener Kurve der weifsen Valenzen, soweit nicht zufällige individuelle Verschiedenheiten (Absorption in den Augenmedien u. s. w.) geringe Abweichungen bedingen, zusammenfallen. Ich habe sofort, nachdem Hr. HILLEBRAND[3] seine in Hrn. HERINGS Laboratorium gewonnene »Kurve der spektralen Verteilung der weifsen Valenzen« veröffentlichte, diese drei Kurven (die HILLEBRANDsche, die DONDERSsche und die von Hrn. C. DIETERICI und mir bestimmte), so gut es möglich war, auf dasselbe Spektrum umgerechnet und innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit völlige Übereinstimmung gefunden.[4] Ich mufs gestehen, dafs mich dieses Eintreffen der HERINGschen Voraussage anfänglich ungemein betroffen machte, — aber zur Zeit der Epicyklen-Theorie hat man ja auch Sonnen- und Mondfinsternisse richtig im voraus berechnet.

[1] F. C. DONDERS, *Onderzoek. gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool.* 3de Reeks. D. VII. Bl. 95. 1882.

[2] A. KÖNIG und C. DIETERICI, *Sitzungsber. der Berl. Akad.* 29. Juli 1886.

[3] F. HILLEBRAND, *Sitzungsber. der Wiener Akad.* Bd. 98. Sitzung vom 21. Febr. 1889.

[4] Vergl. weiter unten, S. 357—359.

Neuerdings hat Hr. HERING[1] selbst Gelegenheit gehabt, einen Fall totaler Farbenblindheit näher zu untersuchen, und fand ebenfalls eine fast völlige Identität beider Kurven.

Die YOUNG-HELMHOLTZsche Theorie hat dieser Thatsache gegenüber so lange einen schweren Stand, als sie an der Unveränderlichkeit der Intensitätskurven für die Grundempfindungen festhält. Wo aber jetzt nach Hrn. E. BRODHUNs Untersuchungen[2] an einer Abhängigkeit der Gestalt derselben von der Intensität nicht mehr gezweifelt werden kann,[3] ist die Hebung des scheinbar vorhandenen Widerspruches nicht schwierig: die Zersetzbarkeit der drei photochemischen Substanzen (oder Erregbarkeit der drei Faserarten), welche für mittlere Helligkeiten jenen drei monochromatischen Farbensystemen zukommt, ist gleich derjenigen, welche für die übrigen Farbensysteme bei sehr niedriger Helligkeit besteht.

Dafs bei total Farbenblinden nicht ausschliefslich diese Art der Helligkeitsverteilung vorkommt, lehren zwei von mir und zwei anderweitig beobachtete, weiter unten § 11 näher besprochene Fälle; damit ist aber, soviel ich sehe, Hrn. HERINGs Beweisführung in ihrem wesentlichsten Punkte hinfällig geworden.

Wenn ich somit auch der spektralen Verteilung der Helligkeitswerte bei sehr niedriger Intensität nicht diejenige Bedeutung und Auffassung beilege, welche ihr Hr. HERING zu teil werden läfst, so ist doch ihre Bestimmung immerhin von sehr grofsem Interesse, besonders da, wie schon aus den oben mitgeteilten Tabellen hervorgeht, der Verlauf der Kurve auch bei dichromatischen Farbensystemen, sowohl bei »Rotblinden« als bei »Grünblinden«, mit demjenigen bei trichromatischen

---

[1] E. HERING, *Pflügers Archiv.* Bd. XLIX. S. 563—608. 1891.

[2] A. KÖNIG, *Sitzungsber. der Berliner Akad. vom 31. März 1887.*

[3] In einiger Zeit wird auch Hr. E. TONN eine grofse Anzahl darauf bezüglicher, auf meine Veranlassung angestellter Versuche veröffentlichen, welche mit den Ergebnissen des Hrn. E. BRODHUN völlig übereinstimmen.

fast völlig übereinstimmt. Die Abweichungen sind so gering, dafs man sie entweder als Beobachtungsfehler, die besonders an den Enden des Spektrums leicht vorkommen können, oder als individuelle und nicht als typische Verschiedenheiten ansehen kann.

Ich gebe hier zunächst eine Zusammenstellung aller mir bekannten Kurven der Helligkeitswerte für sehr niedrige Intensität und aufserdem der Kurven der Helligkeitswerte der bisher näher untersuchten drei Personen mit angeborener totaler Farbenblindheit. Um sie untereinander vergleichen zu können, habe ich sie alle auf das jetzt benutzte Spektrum umgerechnet.

Über die einzelnen Kurven ist noch folgendes zu bemerken.

A. Trichromatische Farbensysteme.

1. A. KÖNIG } aus den obigen Tabellen S. 36 hier
2. E. KÖTTGEN } wiederholt.

3. F. HILLEBRAND. Bei der Umrechnung wurde die Voraussetzung gemacht, dafs die von Hrn. HILLEBRAND in den seiner Abhandlung beigefügten Figuren benutzte Abscissenaxe das seinen Messungen zu Grunde liegende Dispersionsspektrum darstellt, und dafs sein Gaslicht dieselbe spektrale Zusammensetzung hat wie das meinige. Es lassen sich dann durch vergleichende Abmessung der Abstände der FRAUNHOFERschen Linien leicht hinreichend genaue Umrechnungskoeffizienten finden.

4. PERELES (von Hrn. HERING in der zuletzt citierten Abhandlung veröffentlicht). Die Dispersion ist dieselbe wie in meinem Spektrum. Der Umrechnung des Sonnenspektrums auf das Gasspektrum legte ich Koeffizienten zu Grunde, die ich gemeinsam mit Hrn. C. DIETERICI vor mehreren Jahren bestimmt habe. Die Original-Beobachtung bei der Wellenlänge ca. 541 $\mu\mu$ zeigt einen unglatten Verlauf der Kurve, der besonders bei der Umrechnung hervortritt Ich habe mir

daher erlaubt, die Reduktion auf das jetzt von mir benutzte Spektrum auch einmal in der Art durchzuführen, dafs ich (freilich etwas willkürlich) diesen Punkt um 10 % erniedrigte. — Die Resultate beider Untersuchungen sind angegeben.

B. Dichromatische Farbensysteme.

1. E. BRODHUN — »Grünblind«
2. R. RITTER — »Rotblind« } aus den Tabellen auf S. 37 u. 38 wiederholt.

C. Monochromatische Farbensysteme.

1. A. BEYSSELL. Aus meiner gemeinsam mit Hrn. C. DIETERICI veröffentlichten Abhandlung entnommen und auf die etwas verschiedene spektrale Zusammensetzung des jetzigen Spektrums reduziert.[1]

2. Hrn. HERINGS total Farbenblinder. Die Umrechnung geschah in derselben Weise wie bei A. 4.

3. DONDERS' total Farbenblinder. Die Wellenlängen und Helligkeitswerte (Abscissen und Ordinaten), die aus der Figur, welche DONDERS seiner Abhandlung beigefügt hat, abgelesen sind, beziehen sich auf das Interferenzspektrum des Sonnenlichtes. Die Umrechnung geschah in ganz analoger Weise wie bei den übrigen Kurven.

[1] Ich will hier noch bemerken, dafs dieser total Farbenblinde, der inzwischen verstorbene Gewerbeschuldirektor Hr. Dr. A. BEYSSELL, mir mehrfach versichert hat, dafs in grellster Sonnenbeleuchtung Gegenstände, von denen er wisse, dafs sie als rot bezeichnet würden, ihm manchmal eine Farbenempfindung verursachten, die er sonst niemals habe und die ihn jedesmal als etwas ganz Ungewohntes in Erstaunen setze, er habe sie nur sehr selten gehabt; und er konnte auch keine näheren Angaben über die erforderlichen Begleitumstände machen. Es gelang mir nicht, selbst durch Benutzung von rotem monochromatischen Licht in der gröfsten verfügbaren Intensität, diese Empfindung bei ihm absichtlich auszulösen.

Wellenlänge	Helligkeitswerte									
	Trichromatische Farbensysteme (Helligkeitsstufe *A*)					Dichromatische Farbensysteme (Helligkeitsstufe *A*)		Monochromatische Farbensysteme		
	A. König	E. Köttgen	Hillebrand	Pereles (unkorrigiert)	Pereles (korrigiert)	„Grünblind" E. Brodhun	„Rotblind" R. Ritter	A. Bevssell	[Hering]	[Donders]
670 $\mu\mu$	0.00529	0.0113	—	—	—	0.00708	0.00343	0.00079	—	—
650 »	0.0114	0.0253	—	—	—	0.0169	0.00904	0.0074	—	—
625 »	0.0487	0.0630	0.098	—	—	0.0519	0.0504	0.033	—	—
605 »	0.116	0.146	0.27	—	—	0.140	0.139	0.18	—	0.41
590 »	0.233	0.319	0.42	—	—	0.267	0.234	0.33	0.31	0.50
575 »	0.501	0.479	0.65	0.32	0.36	0.529	0.438	0.58	0.59	0.67
555 »	0.812	0.866	0.92	0.81	0.88	0.820	0.774	0.86	0.92	0.84
535 »	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—
520 »	0.919	0.951	0.90	0.80	0.89	0.966	0.956	0.93	0.92	0.84
505 »	0.634	0.739	0.68	0.54	0.60	0.664	0.759	0.61	0.64	0.48
490 »	0.334	0.386	0.48	0.31	0.35	0.400	0.431	0.27	0.42	0.25
470 »	0.154	0.186	0.26	0.21	0.23	0.162	0.196	0.088	0.22	0.092
450 »	0.0466	0.0600	0.11	0.059	0.065	0.0476	0.0650	0.016	0.059	0.035
430 »	0.00867	0.0120	0.049	0.010	0.012	0.00975	0.0109	0.0022	0.015	0.005

Über den Grad der Unsicherheit dieser Umrechnungen, deren Ergebnisse mit Ausnahme der nicht korrigierten Kurve von Hrn. PERELES auf Tafel VI eingezeichnet sind, kann ich, wie in der Natur der Sache liegt, durchaus kein sicheres Urteil abgeben und bin daher ungewifs, wieviel von den zwischen allen diesen Kurven vorkommenden Abweichungen den benutzten Koeffizienten, und wieviel der Beschaffenheit der Farbensysteme selbst zuzurechnen ist. Nur sind die grofsen Unterschiede am blauen Ende des Spektrums wohl ohne Zweifel der durch die Altersdifferenzen der untersuchten Personen bedingten, mehr oder minder starken Gelbfärbung der Linse zuzuschreiben.

§ 8. Die untere Reizschwelle.

Die niedrigste der in der vorliegenden Untersuchung benutzten Helligkeitsstufen *(A)* war durch den Umstand gegeben,

dafs bei noch geringerer Intensität die Einstellungsfehler auf gleiche Helligkeit trotz der gänzlich verschwundenen Farbendifferenz zu beträchtlich waren. Die untere Reizschwelle lag schon sehr nahe, und es wurde bei den vier jetzt untersuchten Personen bestimmt, auf welchen Bruchteil die objektive Intensität der Helligkeitsstufe A bei Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ zu vermindern war, um gerade noch eben merklich zu bleiben. Es ergaben sich, wie auch schon in der Tabelle auf S. 32 angegeben ist, folgende Werte:

Beobachter	S = untere Reizschwelle
A. König	0,11 A = 0,00024
E. Köttgen	0,34 A = 0,00079
E. Brodhun	0,29 A = 0,00074
R. Ritter	0,11 A = 0,00037

Es geht aus dieser Zusammenstellung hervor, dafs die Beschaffenheit des Farbensystems ohne Einflufs ist, denn Fräulein E. Köttgen und ich bilden, obgleich wir beide ein normales trichromatisches Farbensystem besitzen, die Extreme, während der »rotblinde« Hr. Ritter mit mir ziemlich zusammenfällt.

Die Unsicherheit der Einstellung auf Ebenmerklichkeit ist zwar beträchtlich, aber wenn man sich längere Zeit an völlige Dunkelheit adaptiert hat, doch immerhin unvergleichlich geringer, als man nach den ersten Versuchen, die stets recht mangelhaft ausfallen, erwarten sollte.

Hr. R. Ritter und ich haben die unteren Reizschwellen auch für die anderen spektralen Lichter genauer bestimmt. Es ist ersichtlich, dafs man die »ebenmerkliche Helligkeit« als eine bestimmte Helligkeitsstufe auffassen kann, und dafs demgemäfs für diese sich ebensogut, wenn auch mit einem viel gröfseren Beobachtungsfehler eine »Kurve gleichwertiger Spaltbreiten« und eine »Kurve der Helligkeitswerte« bestimmen

läfst, wie bei den anderen Helligkeitsstufen. Das, was man eben wahrnehmen kann, hat stets dieselbe Helligkeit, gleichviel von welchem Licht der Reiz ausgeübt wird. Hr. RITTER hatte bei der Reizschwelle niemals die Empfindung irgend einer Farbe, während ich bei den Wellenlängen 650 $\mu\mu$ und 670 $\mu\mu$ stets den schwachen Eindruck von Rot bekam.

Die in solcher Weise gemachten Bestimmungen der Spaltbreiten und Helligkeitswerte für unser Spektrum sind in den oben bereits abgedruckten Tabellen auf S. 35—38 schon enthalten und als Helligkeitsstufe *S* eingeordnet. Da der Verlauf der Zahlen kein so glatter ist wie in den übrigen Kolumnen, so habe ich die entsprechenden Kurven in den Tafeln III und IV nicht eingezeichnet; sie würden die Übersichtlichkeit beeinträchtigt haben.

Hr. R. RITTER wurde bei der Bestimmung der unteren Reizschwellen durch das starke Eigenlicht seiner Netzhaut sehr oft gestört und mufste dann mehrere Minuten lang seine Einstellungen unterbrechen, um die aufgetretenen subjektiven Erscheinungen langsam abklingen zu lassen. Hieraus ist es auch zu erklären, dafs der Verlauf seiner Kurve der Helligkeitswerte bei den Reizschwellen viel unglatter ist als bei mir. An vier Stellen sind die Werte im Widerspruch mit dem PURKINJEschen Phänomen und daher in den obigen Tabellen mit einem Sternchen (*) versehen. Da aber gerade diese Werte aufserhalb eines glatten Verlaufes der Kurve liegen, so glaube ich mich ohne Bedenken berechtigt, sie als fehlerhaft zu bezeichnen und aus den neun übrigen Werten auf das regelmässige Vorhandensein des PURKINJEschen Phänomens auch beim Übergang der Helligkeitsstufe *A* zu der Helligkeitsstufe *S* zu schliefsen.

Die folgende Tabelle enthält eine nochmalige Zusammenstellung der Spaltbreiten und Helligkeitswerte für die untere Reizschwelle bei Hrn. RITTER und mir; nur habe ich jetzt bei Hrn. RITTER an zwei von den oben erwähnten vier

Stellen (505 $\mu\mu$ und 470 $\mu\mu$) die früheren Mittelwerte durch solche Einzeleinstellungen ersetzt, welche im glatten Kurvenverlaufe liegen. Die ersetzten Mittelwerte sind in Klammern mit kleinen Zahlen nochmals beigefügt.

Helligkeitsstufe der unteren Reizschwelle (Stufe *S*).

Wellenlänge	Gleichwertige Spaltbreiten		Helligkeitswerte	
	A. König	R. Ritter	A. König	R. Ritter
670 $\mu\mu$	296.1	271.8*	0.00338	0.00368*
650 »	178.35	121.2	0.00561	0.00825
625 »	34.78	22.35	0.0288	0.0447
605 »	12.12	13.85	0.0825	0.0722
590 »	5.66	6.07	0.177	0.165
575 »	2.76	2.30	0.362	0.435
555 »	1.40	1.24*	0.713	0.806*
535 »	1.—	1.—	1.—	1.—
520 »	1.071	1.01	0.934	0.990
505 »	1.539	1.20 (1.85*)	0.650	0.833 (0.541*)
490 »	2.342	2.16	0.427	0.463
470 »	5.974	4.80 (7.23*)	0.167	0.208 (0.138*)
450 »	19.21	13.58	0.0521	0.0736
430 »	131.6*	89.50	0.0076*	0.0112

In einer früher gemeinsam mit Hrn. E. Brodhun gemachten Untersuchung[1] haben wir unter anderm auch die Gröfse der unteren Reizschwelle zu bestimmen gesucht. Die Einheit der Helligkeit war damals zwar dieselbe wie jetzt, aber es wurde bei dem Übergang von einer Wellenlänge auf die andere das Purkinjesche Phänomen nicht berücksichtigt. Da wir dieses jetzt in Rechnung ziehen können, so sind wir in der Lage, die früher bei mir gewonnenen Resultate mit den jetzigen zu vergleichen, indem wir sie in Helligkeitswerten,

[1] A. König und E. Brodhun, *Sitzungsber. der Berliner Akad.* Sitzung vom 26. Juli 1888.

Licht von 535 $\mu\mu$ bei der Stufe S gleich 1 gesetzt, ausdrücken.

Wellenlänge	Frühere Resultate		Jetzige Resultate in Helligkeitswerten (535 $\mu\mu$ = 1)
	in früheren Helligkeitseinheiten	in Helligkeitswerten (535 $\mu\mu$ = 1)	
670 $\mu\mu$	0,060	0,00342	0,00338
605 »	0,056	0,152	0,0825
575 »	0,0029	0,195	0,362
505 »	0,00017	0,317	0,650
470 »	0,00012	0,0749	0,167
430 »	0,00012	0,0133	0,0076

Die Übereinstimmung ist scheinbar keine gute; nur die Werte für 670 $\mu\mu$ sind dieselben, bei den übrigen ist der jetzige Wert entweder ungefähr das Doppelte oder die Hälfte des frühern. Berücksichtigt man aber, dafs in der früheren Untersuchung die Schwächung des Lichtes, die an einzelnen Stellen des Spektrums bis auf $^1/_{1000}$ der ursprünglichen Intensität vorgenommen werden mufste, zum gröfsten Teile durch Absorptionsgläser geschah, deren Auslöschungskoeffizienten vermittels besonderer spektralphotometrischer Messungen bestimmt waren, so glaube ich, dafs jeder in derartigen Messungen erfahrene Beobachter keine bessere Übereinstimmung erwarten wird. Die jetzigen Bestimmungen der unteren Reizschwellenwerte sind den früheren in der Zuverlässigkeit der Methode unvergleichlich überlegen, und die damals von Hrn. BRODHUN und mir gemachten Messungen sind nur als die ersten Versuche einer annähernden Auffindung der Gröfsenordnung dieser Werte anzusehen.

Hr. W. UHTHOFF[1] hat früher auf meine Veranlassung die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungs-

[1] W. UHTHOFF, *Verhandl. der Physiol. Gesellschaft zu Berlin.* Sitzung vom 13. Februar 1885. (Abgedr. in *du Bois' Arch. f. Physiol.* Jahrg. 1885.) — *Gräfes Arch. f. Ophthalm.* Bd. 32. (1). S. 198. 1886.

intensität untersucht und dabei auch festgestellt, wie weit man die Beleuchtung verringern mufste, um noch eben etwas zu sehen, d. h. um bei gröfster Annäherung des Auges an einen schwarzen, auf einer weifsen Tafel befindlichen, grofsen SNELLEN-schen Probehaken dessen Stellung noch eben wahrnehmen zu können. Es ist ersichtlich, dafs die hierzu erforderliche Beleuchtung etwas oberhalb der unteren Reizschwelle liegen mufs. Da ich mich damals selbst bei diesen Versuchen beteiligte, so ist ein Vergleich mit dem jetzt bei mir für die untere Reizschwelle erhaltenen Werte möglich. Die bei den früheren Versuchen für mich notwendige Minimal-Beleuchtung war gleich derjenigen von einer Kerze in ca. 360 m Entfernung. Berücksichtigt man nun, dafs damals mit freiem Auge, d. h. ohne irgend ein vorgesetztes Diaphragma, beobachtet wurde, und dafs (wie ich durch eine nachträglich gemachte Messung fand) meine Pupillenöffnung in solcher Dunkelheit ca. 60 qmm grofs ist, und dafs endlich das zur Definition unserer jetzigen Helligkeitseinheit benutzte Platinlicht ungefähr gleich 1,7 Kerzen ist, so ergiebt sich die damalige Beleuchtungsintensität zu ca. 0,00030 unserer jetzigen Helligkeitseinheit. Wir haben aber soeben (S. 56) gesehen, dafs sich jetzt für meine untere Reizschwelle der Wert von 0,00024 Einheiten fand. Die Übereinstimmung ist besser, als man sie unter den vorliegenden Umständen nur erwarten kann. In Wirklichfeit wird der Unterschied beider Werte wohl etwas gröfser sein.

§ 9. Bestimmung der Helligkeitswerte in einem Spektrum mit gleichmäfsiger Energieverteilung.

Die bisher angeführten Kurven gleichwertiger Spaltbreiten und der Helligkeitswerte haben nur Bezug auf das von dem benutzten Spektralapparat gelieferte Dispersionsspektrum der Triplex-Gasbrenner. Eine absolute Bedeutung kommt ihnen erst dann zu, wenn man sie reduziert auf ein Spektrum mit gleichmäfsiger Verteilung der Energie, so dafs man also den

relativen Helligkeitswert der verschiedenen, nur in der Wellenlänge sich unterscheidenden Formen der Licht-Energie bestimmt. Der direkteste Weg zu einer solchen Umrechnung würde in einer experimentellen Messung der Energieverteilung in dem hier benutzten Spektrum bestehen. Ihn zu betreten, war ich jetzt noch nicht in der Lage; ich hoffe jedoch, derartige Messungen bei der beabsichtigten Wiederholung und Erweiterung der vorliegenden Untersuchung in den Beobachtungsplan aufnehmen zu können.

Um jedoch jetzt schon einigermafsen einen Überblick über das Ergebnis einer solchen Umrechnung zu gewinnen, habe ich anderweitig vorliegende Messungen der spektralen Energieverteilung zu Hülfe genommen, und zwar benutzte ich die letzte der von Hrn. S. P. LANGLEY[1] gemachten Bestimmungen, welche wohl als die zuverlässigste der bisher ausgeführten betrachtet werden mufs. Unter der Voraussetzung, dafs das von Hrn. LANGLEY untersuchte Sonnenlicht dieselbe Beschaffenheit hat wie dasjenige, welches Hr. C. DIETERICI und ich bei der Reduktion unserer früher gemeinsam gemachten Beobachtungen spektralphotometrisch mit dem Gaslicht verglichen haben, findet sich die folgende relative Energieverteilung in dem in der vorliegenden Untersuchung benutzten Dispersionsspektrum des Lichtes der Triplex-Gasbrenner, wobei der Wert für die Wellenlänge 535 $\mu\mu$ gleich 1 gesetzt ist.

[1] S. P. LANGLEY, *Sill. Journ.* (3) XXXVI. p. 359. 1888. — Die »Energy and Vision« betitelte Abhandlung verfolgt ungefähr dasselbe Ziel, welches in diesem Paragraphen angestrebt ist. Ich möchte nicht auf eine vergleichende Kritik dieser Arbeit eingehen, so lange ich selbst noch keine Energiemessungen ausgeführt habe.

Tabelle der Energieverteilung im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

Wellenlänge	Energie	Wellenlänge	Energie
670 $\mu\mu$	13.00	535 $\mu\mu$	1.—
650 »	8.88	525 »	0.720
625 »	5.58	505 »	0.488
605 »	3.99	490 »	0.370
590 »	2.97	470 »	0.251
575 »	2.27	450 »	0.169
555 »	1.48	430 »	0.114

Multipliziert man mit diesen Koeffizienten die Ordinaten in den Kurven gleichwertiger Spaltbreiten, so erhält man diejenigen Energiemengen, welche zur Erzeugung der betreffenden Helligkeitsstufe gleichwertig sind; ich werde die so entstehenden Kurven bezeichnen als »Kurven gleichwertiger Energiemengen«. Berechnet man die Reziproken, so ergeben sich die »Kurven der Energie-Helligkeitswerte«.

Da diese Beziehung auf absolute Energie nur zu einem vorläufigen Überblick dienen soll, so habe ich nicht alle gewonnenen Kurven in dieser Weise umgerechnet, sondern mich auf die Helligkeitsstufen *S*, *A* und *H* beschränkt, und zwar bei der Stufe *H* ausschliefslich auf die mein Farbensystem betreffenden Kurven.

Bei den Helligkeitsstufen *S* und *A* habe ich von den zwei, resp. vier »Kurven gleichwertiger Energiemengen« die Mittelwerte gebildet und von diesen dann erst die »Kurven der Energie-Helligkeitswerte« berechnet. Derartige Durchschnittswerte halte ich bei den Stufen *S* und *A* für völlig berechtigt, da hier nur geringe individuelle Verschiedenheiten vorzukommen scheinen, während, wie wir in § 6 gesehen haben, bei den höheren Helligkeitsstufen gröfsere, den ganzen Charakter der Kurve beeinflussende Abweichungen vorkommen.

Bei den Reizschwellen des Hrn. R. RITTER habe ich hier für die Wellenlängen 505 $\mu\mu$ und 470 $\mu\mu$ die in der Tabelle auf S. 58 an Stelle der Mittelwerte eingeführten und dort schon besprochenen Werte ausschliefslich berücksichtigt.

Helligkeitstufe *H.*

A. KÖNIG.

Wellenlänge	Gleichwertige Energiemengen	Helligkeitswerte der Energie
670 $\mu\mu$	15.21	0.066
650 »	3.73	0.27
625 »	1.61	0.62
605 »	1.09	0.92
590 »	0.98	1.02
575 »	0.96	1.04
555 »	0.87	1.15
535 »	1.—	1.—
520 »	1.30	0.77
505 »	2.18	0.46
490 »	3.72	0.27

Helligkeitsstufe *A.*

Wellenlänge	Gleichwertige Energiemengen					Helligkeitswerte der Energie (*Mittelwerte*)
	A. KÖNIG	E. KÖTTGEN	E. BRODHUN	R. RITTER	*Mittelwerte*	
670 $\mu\mu$	2457	1151	1837	2504	1987	0.0005
650 »	778	350	525	982	659	0.0015
625 »	115	95	107	111	107	0.0093
605 »	34.3	27.3	28.5	28.5	29.6	0.034
590 »	12.7	9.3	11.1	12.7	11.45	0.087
575 »	4.54	4.74	4.29	5.18	4.69	0.21
555 »	1.82	1.71	1.80	1.91	1.81	0.55
535 »	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—
520 »	0.78	0.76	0.75	0.75	0.76	1.32
505 »	0.77	0.66	0.74	0.64	0.70	1.43
490 »	1.11	0.96	0.92	0.86	0.96	1.04
470 »	1.63	1.35	1.55	1.28	1.45	0.69
450 »	3.64	2.82	3.55	2.60	3.15	0.32
430 »	13.16	9.5	11.7	10.4	11.2	0.089

Helligkeitsstufe *S* (untere Reizschwelle).

Wellenlänge	Gleichwertige Energiemengen			Helligkeitswerte der Energie
	A. König	R. Ritter	*Mittelwerte*	*(Mittelwerte)*
670 $\mu\mu$	3849	3533	3691	0.00027
650 »	1584	1076	1330	0.00075
625 »	194	125	159	0.0063
605 »	48.4	55	51.7	0.019
590 »	16.80	18	17.4	0.057
575 »	6.27	5.22	5.74	0.17
555 »	2.07	1.84	1.95	0.51
535 »	1.—	1.—	1.—	1.—
520 »	0.77	0.72	0.75	1.33
505 »	0.75	0.60	0.68	1.47
490 »	0.87	0.80	0.83	1.20
470 »	1.50	1.20	1.35	0.74
450 »	3.25	2.30	2.77	0.36
430 »	15.00	10.2	12 6	0.079

In Tafel V habe ich zu den oben schon besprochenen Kurven auch meine, auf die Helligkeitsstufe *H* bezügliche Kurve der Helligkeitswerte der Energie eingetragen. Dafs dieselbe in ihrem mittleren Teile einen etwas unglatten Verlauf zeigt, liegt ohne Zweifel an der Unsicherheit der benutzten Umrechnungskoeffizienten.

Die Kurven der (mittleren) Helligkeitswerte der Energie sowohl für die Stufe *A* als auch für die unteren Reizschwellen (Stufe *S*) sind auf Tafel VI eingezeichnet.

Ich will nicht unterlassen, mit besonderem Nachdruck darauf hinzuweisen, dafs alle diese auf die Energie bezüglichen Werte einen grofsen tiefeingreifenden Fehler besitzen, indem nämlich die Absorption in der Macula lutea vernachlässigt ist. Ob es später gelingen wird, diesen Fehler durch Ausführung derselben Beobachtungen in der unmittelbaren Nachbarschaft der Macula lutea, wo das Farbensystem wohl noch dasselbe wie im Fixationspunkt sein wird, zu beseitigen, mufs erst die Erfahrung lehren. Trotz dieses Mangels der

Kurve der Energie-Helligkeitswerte habe ich doch noch eine Rechnung an dieselbe angeknüpft, welche uns eventuell einen Einblick in das Wesen der mit der Lichtempfindung verknüpften peripheren Vorgänge hätte thun lassen. Auf der Helligkeitsstufe *A*, wo mit Ausnahme des roten Endes des Spektrums von allen übrigen sichtbaren Schwingungen des Lichtäthers die Empfindung von Grau ausgelöst wird, wo also auf einem weiten Bereiche die von den verschieden schnell schwingenden Ätherwellen veranlafsten peripheren Vorgänge nur durch die Intensität sich unterscheiden, dürfte der Gedanke nicht ausgeschlossen sein, die letzteren als rein mechanische Mitschwingungen gewisser, freilich noch unbekannter Elemente anzunehmen. Die Mechanik lehrt uns, dafs die Intensität, d. h. die lebendige Kraft derartig ergänzter Schwingungen am gröfsten ist, wenn die Eigenschwingungen der erregten Masse dieselbe Schwingungszahl besitzen wie die erregenden Schwingungen, und dafs die Intensität in bestimmter Weise abnimmt, wenn die Differenz der Schwingungszahlen beider sich vergröfsert. Die Schnelligkeit dieser Abnahme ist abhängig von der Art der Dämpfung. Ich habe nun unter der Annahme, dafs die Reibung der in der Netzhaut entstehenden Bewegungsvorgänge der Geschwindigkeit proportional ist, diejenige Kurve der spektralen Verteilung der Mitschwingungsintensität gesucht, welche sich den Kurven der Energie-Helligkeitswerte am besten anschmiegt, fand aber stets, dafs der Abfall der berechneten Mitschwingungskurven in der Nähe des Maximums (ca. 512 $\mu\mu$) zu schnell und dann nach den Enden des Spektrums hin zu langsam vor sich ging.

Ich sehe davon ab, hier auf die Einzelheiten dieses Rechnungsversuches näher einzugehen, behalte mir aber vor, denselben Gedanken auf Grund besseren Beobachtungsmaterials nicht nur an der fast monochromatischen Kurve der Helligkeitsstufe *A* sondern auch an den Grundempfindungskurven der übrigen Helligkeitsstufen, vielleicht mit Abänderung der

jetzigen Annahme über die Gröfse der Reibung, wiederaufzunehmen.

§ 10. Die partielle Farbenblindheit und ihre Erklärung nach der Theorie der Gegenfarben.

Die Theorie der Gegenfarben mufs folgerichtig die partielle Farbenblindheit, d. h. die Farbensysteme zweifacher Mannigfaltigkeit durch den Ausfall einer der drei von ihr angenommenen Sehsubstanzen erklären. Da die sicher beobachteten partiell Farbenblinden nun unter gewissen Umständen Rot und Grün miteinander verwechseln, hingegen Gelb und Blau ohne irgend welche Schwierigkeit unterscheiden können, so nimmt jene Theorie bei ihnen einen Ausfall der Rotgrünsubstanz an und bezeichnet sie demgemäfs als »Rotgrünblinde«.[1] Beim weiteren Ausbau dieser Theorie machte nun die Erfahrungsthatsache, dafs die partiell Farbenblinden in zwei völlig oder fast völlig voneinander gesonderte Gruppen zerfallen, einige Schwierigkeit. Hr. HERING[2] hat die individuellen Verschiedenheiten in den Absorptionsverhältnissen der Augenmedien und des Pigmentes der Macula lutea zu Hülfe nehmen müssen, um hier die Übereinstimmung mit der Erfahrung aufrecht zu erhalten. Nach unseren bisherigen Kenntnissen konnte die Unrichtigkeit dieser HERINGschen Annahme nicht ohne weiteres nachgewiesen werden, obgleich es doch wohl als ziemlich unwahrscheinlich anzusehen war, dafs die mittleren Grade der Absorption gar nicht oder wenigstens fast gar nicht vorkommen sollten, während die ganz geringen und die hohen Grade in ungefähr gleichem Prozentsatz vertreten sind.

So lange man die von Hrn. C. DIETERICI und mir an partiell Farbenblinden und an Farbentüchtigen gemachten

[1] E. HERING, Grundzüge einer Theorie des Farbensinnes. *Sitzungsber. der Wiener Akad.* Sitzung vom 15. Mai 1874.

[2] E. HERING, Über individuelle Verschiedenheiten des Farbensinnes. *Lotos.* Neue Folge. Bd. VI. 1885.

Messungen[1] nicht als unrichtig nachweist, mufs es als eine höchst unwahrscheinliche Tücke der Natur betrachtet werden, dafs sie die beiden fast ausschliefslich hier vorkommenden Grade der Absorption in den Augenmedien genau so gewählt hat, dafs die von uns gefundene Beziehung zwischen partieller Farbenblindheit und den normalen trichromatischen Systemen sich als das Ergebnis einer vorurteilsfrei ausgeführten Rechnung einstellen konnte und bei den die Möglichkeit eines solchen Zufalles nicht ahnenden Rechnern auch einstellen mufste. Wären die Absorptionsverhältnisse auch nur etwas andere so hätten wir die (nach Hrn. HERINGs Auffassung nur scheinbare) Beziehung gar nicht finden können.

In der genannten Untersuchung haben wir die Intensitätskurven der »warmen Elementarempfindung« bei vier partiell Farbenblinden bestimmt, und zwar bei einer Helligkeit, die im Mittel etwa unserer jetzigen Stufe *F* entspricht. Dieser Bestimmung lag durchaus keine hypothetische Annahme zu Grunde, wie sich aus unserer Darstellung ohne weiteres ergiebt. Je zwei und zwei jener vier Personen besafsen beinahe denselben Verlauf dieser Kurven. Bildet man bei jeder Gruppe das Mittel aus den beiden fast gleichen Kurven und dividiert die (z. T. durch graphische Interpolation gewonnenen) Ordinaten, welche den in der vorliegenden Untersuchung benutzten Wellenlängen entsprechen, so bekommt man das Verhältnis der Absorptionskoeffizienten, welche unter Annahme des HERINGschen Erklärungsversuches den Augenmedien und dem Pigment der Macula lutea zugeschrieben werden müssen.

Eine derartige Rechnung habe ich jetzt ausgeführt und gebe hier das Resultat derselben an. Da man nur die relativen Werte der Absorption bestimmen kann, nicht aber ihren absoluten Betrag, so setze ich den Wert für 535 $\mu\mu$ gleich 1; dann erhält man

[1] A. KÖNIG und C. DIETERICI, *Sitzungsber. der Berliner Akad.* Sitzung vom 29. Juli 1886.

Wellenlänge	Verhältnis der durchgelassenen Lichtmengen
670 $\mu\mu$	14.97
650 »	9.94
625 »	6.88
605 »	3.25
590 »	2.16
575 »	1.49
555 »	1.14
535 »	1.—
520 »	0.90
505 »	0.80
490 »	0.61

Ist die Anschauung von Hrn. HERING richtig, so müssen also die Augenmedien und das Pigment der Macula lutea für Licht von der Wellenlänge 670 $\mu\mu$ bei der einen Gruppe der partiell Farbenblinden 14.97 mal so durchlässig sein, als für Licht von der Wellenlänge 535 $\mu\mu$ bei der anderen Gruppe. Noch extremere Verhältnisse ergeben sich, wie aus der Tabelle ersichtlich, wenn man 670 $\mu\mu$ und 490 $\mu\mu$ miteinander vergleicht. Ich überlasse den Anatomen und Ophthalmologen die Entscheidung, ob diese in der HERINGschen Hülfshypothese implicite vorausgesetzten Absorptionsverhältnisse, d. h. Färbungen vorkommen können, und enthalte mich selbst jeglichen Urteils.

Nunmehr wende ich mich zu einer mehr physikalischen Behandlung und Untersuchung der vorliegenden Frage.

Wenn der Unterschied in den beiden Gruppen der partiell Farbenblinden im wesentlichen durch verschiedene Absorptionsverhältnisse in den Augen verursacht ist, so mufs sich derselbe, da die Absorptionskoeffizienten unabhängig von der Intensität des auffallenden Lichtes sind, gleichmäfsig auf allen Helligkeitsstufen zeigen. Das in § 4 mitgeteilte Beobachtungsmaterial ermöglicht aber bereits, eine derartige Prüfung und Vergleichung anzustellen.

Die Hrn. RITTER und BRODHUN, welche den beiden verschiedenen Gruppen der partiell Farbenblinden angehören, haben die spektrale Verteilung der Helligkeitswerte sowohl bei der sehr niedrigen Helligkeitsstufe *A*, als auch bei der Helligkeitsstufe *H*, resp. der gleichwertigen Helligkeitsstufe *FGH* bestimmt. Dividieren wir nun auf derselben Helligkeitsstufe bei derselben Wellenlänge den dem BRODHUNschen Farbensystem zukommenden Helligkeitswert durch den RITTERchen, so giebt uns der Quotient an, wievielmal gröfser in dem BRODHUNschen Auge die Durchlässigkeit für Licht der betreffenden Wellenlänge ist als in dem RITTERschen. Ist nun die Verschiedenheit der Absorptionsverhältnisse die wesentliche Ursache des Unterschiedes beider Farbensysteme, so mufs für dieselbe Wellenlänge bei allen Helligkeitsstufen, also auch bei den beiden hier zur Prüfung heranzuziehenden, jener Quotient derselbe sein.

Die nachfolgende Tabelle enthält diese Quotienten.

Wellenlänge	Helligkeitswerte von BRODHUN, dividiert durch Helligkeitswerte von RITTER	
	Helligkeitsstufe *A*	Helligkeitsstufe *H* resp. *FGH*
670 $\mu\mu$	2.06	10.4
650 »	1.87	8.83
625 »	1.03	5.33
605 »	1.00	3.02
590 »	1.14	1.83
575 »	1.21	1.35
555 »	1.06	1.18
535 »	1.—	1.—
520 »	1.01	0.95
505 »	0.87	0.72
490 »	0.93	0.56

Bei der Helligkeitsstufe *A* schwanken, abgesehen von den Wellenlängen 670 $\mu\mu$ und 650 $\mu\mu$, wo auch noch nicht immer

völlige Farblosigkeit der Empfindung eingetreten war, die Quotienten stets hin und her, hingegen nehmen sie bei der Helligkeitsstufe H in der Richtung von Rot nach Blau stets ab; infolgedessen ist der Quotient im Roten (670 bis 625 $\mu\mu$) für die Helligkeitsstufe H ungefähr fünfmal so grofs wie für die Helligkeitsstufe A, während er im Grünblauen (490 $\mu\mu$) nur etwa $^3/_5$ beträgt.[1]

Dieser Thatsache gegenüber mufs der von Hrn. HERING gemachte bisherige Versuch, die partielle Farbenblindheit mit der Theorie der Gegenfarben in Einklang zu bringen, für mifslungen erachtet werden. So lange Hr. HERING also keine andere und haltbarere Hülfshypothese zu diesem Zwecke aufstellt, wird man daher genötigt sein, der YOUNG-HELMHOLTZschen Farbentheorie für die Berechtigung ihres Daseins noch etwas mehr zuzugestehen als das Gewohnheitsrecht, und es dürfte nicht zutreffen, ihre gegenwärtige Bedeutung mit der Wertschätzung eines ehrwürdigen Erbstückes zu vergleichen.

§ 11. Die totale Farbenblindheit und ihre Erklärung aus der Theorie der Gegenfarben.

Die totale Farbenblindheit entsteht nach der Theorie der Gegenfarben durch den Ausfall sowohl der rotgrünen als der blaugelben Sehsubstanz. Es ist dann nur die schwarzweifse Sehsubstanz vorhanden, und die Gesamtheit der Gesichtsempfindungen, welcher ein total Farbenblinder fähig ist, mufs in den verschiedenen Abstufungen der Reihe Schwarz-Grau-Weifs bestehen.

Als Hr. HERING zum ersten Male[2] die totale Farbenblindheit

[1] Die nahe Übereinstimmung dieser Quotienten der Helligkeitswerte mit den auf S. 68 berechneten Quotienten der Intensitätswerte der »warmen Elementarempfindung« zeigt, dafs die Helligkeit einer Farbenempfindung jedenfalls nur sehr unwesentlich von dem Blauwert des betreffenden Lichtes abhängt.

[2] E. HERING, Zur Erklärung der Farbenblindheit aus der Theorie der Gegenfarben. *Lotos*, Neue Folge. Bd. I. 1880.

besprach, konnte er bereits an dem bekannten von O. BECKER[1] beobachteten und beschriebenen Falle einer derartigen unilateralen angeborenen Anomalie, wo also die Empfindungen des anomalen Auges mit den Empfindungen des normalen verglichen werden konnten, darauf hinweisen, dafs diese Erklärung, was die Qualität der Empfindungen anbetrifft, völlig richtig war. Die Empfindungen des total farbenblinden Auges waren nämlich, verglichen mit denjenigen des normalen, Schwarz-Grau-Weifs. Aber auch die Intensitätsverhältnisse der Empfindungen bereiteten keine Schwierigkeiten. Hr. HERING legte damals den verschiedenen Grundfarben seiner Theorie die gleiche Helligkeit bei, und so mufste trotz des Fortfalles der farbigen Valenzen die Helligkeitsverteilung im Spektrum unverändert bleiben, d. h. es mufste für das total farbenblinde Auge das Maximum der Helligkeit im Spektrum ebenso wie für das farbentüchtige Auge im Gelb liegen. Die Beobachtungen BECKERS waren auch mit dieser theoretischen Erwartung Hrn. HERINGS in völliger Übereinstimmung. Seitdem hat nun aber Hr. HERING die Theorie der Gegenfarben dahin ausgebildet, dafs er den Begriff der spezifischen Helligkeit einführt und nunmehr den verschiedenen Grundfarben auch verschiedene Helligkeiten beilegt. Wie schon in § 5 ausgeführt worden, ist infolgedessen die spektrale Verteilung der Helligkeit nunmehr eine mehrgliedrige lineare Funktion der einzelnen Urvalenzen und es fällt das Maximum der weifsen Valenz nicht an diejenige Stelle im Spektrum, welche bei den gewöhnlich benutzten Intensitäten den Eindruck der gröfsten Helligkeit macht; es fällt nicht in das Gelb, sondern in das Grün. Nach dieser Auffassung kann also die spektrale Helligkeitsverteilung des total Farbenblinden nicht mit der normalen Helligkeitsverteilung des Farbentüchtigen übereinstimmen. In § 7 ist oben bereits

[1] O. BECKER, *Gräfes Arch. f. Ophthalm.* Bd. 25 (2) S. 205. 1879.

ausführlicher über diesen Punkt gesprochen worden und wir haben dort gesehen, dafs die spektrale Helligkeitsverteilung bei drei genau untersuchten Fällen totaler Farbenblindheit diese neue Auffassung des Hrn. HERING bestätigt. Es kann uns nicht wundern, dafs Hr. HERING[1] in seiner letzten, schon oft citierten Abhandlung auf diese für seine Anschauung ja so erfreuliche Übereinstimmung seiner Theorie mit der erst nachträglich gewonnenen Erfahrung hinweist; wohl aber mufs es erstaunen, dafs nunmehr der BECKERsche Fall, der doch eine andere Helligkeitsverteilung aufweist, noch immer ohne weitere Erläuterung als vollgültige Stütze der Theorie der Gegenfarben aufgeführt wird. Eine Ausfüllung dieser Lücke seiner Darstellung würde Hrn. HERING sicherlich Manche, unter denen auch ich mich befinde, zu grofsem Danke verpflichten, die sich jetzt vergeblich an der Hebung dieses scheinbaren Widerspruches abmühen.

Da die Zuverlässigkeit der Angaben in dem BECKERschen Fall von DONDERS angezweifelt worden ist, so möchte ich an dieser Stelle noch auf andere Fälle totaler Farbenblindheit, sowohl angeborener als erworbener, hinweisen, bei denen die Erklärung der Helligkeitsverteilung auf Grund der neuesten Form der Theorie der Gegenfarben (mir wenigstens) ähnliche Schwierigkeiten bereitet.

1. Ein von Hrn. H. MAGNUS[2] beschriebener Fall angeborener totaler Farbenblindheit.

Obgleich hier dieselben Begleiterscheinungen (Lichtscheu, geringe Sehschärfe u. s. w.) vorhanden sind, welche stets der oben in § 7 näher besprochenen Form totaler Farbenblindheit zukommen, und obgleich hier keine wirklichen Helligkeitsmessungen im Spektrum angestellt worden sind, glaube ich doch, dafs man in diesem Falle eine Helligkeitsverteilung annehmen mufs,

[1] E. HERING, *Pflügers Arch.* Bd. 49. S. 563. 1891.

[2] H. MAGNUS, *Centralbl. f. prakt. Augenheilkunde.* 4. Jahrg, S. 373. 1880.

welche im wesentlichen mit derjenigen des BECKERschen Falles übereinstimmt. Bei jener in den Kurven unserer Tafel VI dargestellten Verteilung der spektralen Helligkeitswerte besteht die charakteristischste Eigenschaft des (hier monochromatischen) Spektrums in einem nach beiden Seiten völlig symmetrischen Abfall der Helligkeit. Hr. MAGNUS sagt aber hier ausdrücklich, dafs »der Übergang aus dem Hellen zu den dunkleren Partien auf der roten Seite des Spektrums schneller erfolge, als nach dem violettem Ende hin«. Ferner wird bestimmt angegeben, dafs »für beide Augen die gröfste Helligkeit ziemlich genau in der Natronlinie lag«. Dafs eine Verkürzung des Spektrums nicht beobachtet wurde, hat nach meinen Erfahrungen wenig Wert, so lange man hier keine besonderen Vorsichtsmafsregeln zur Abblendung des diffusen Lichtes trifft; so ist z. B. neuerdings in dieser Weise noch Hr. F. KREYSSIG[1] zweifellos irre geführt worden.

2. Ein von den Hrn. H. SCHÖLER und W. UHTHOFF[2] beschriebener Fall erworbener totaler Farbenblindheit.

Ein 68jähriger Mann erblindet plötzlich unter heftigem Kopfschmerz und starkem Blutandrang zum Kopfe Nach etwa 24 Stunden begann eine allmähliche Besserung, welche nach mehreren Tagen bei der Aufnahme in die Klinik folgenden Zustand des Sehvermögens herbeigeführt hatte:

rechts Finger in 10 Fufs Entfernung
links » 12 » »

[1] F. KREYSSIG, *Genuine totale Farbenblindheit.* Ein Beitrag zur Charakteristik derselben. Mitteilungen aus der ophthalmiatrischen Klinik in Tübingen. Herausgegeben von Prof. NAGEL. Bd. 2. Heft 3. S. 332. 1890. — Vergl. mein Referat über diese Arbeit in: *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.* Bd. II. S. 122. 1891.

[2] SCHÖLER und UHTHOFF, *Beiträge zur Pathologie des Sehnerven und der Netzhaut bei Allgemeinerkrankungen.* S. 69—74. Berlin 1884. — Dieser Fall ist ebenfalls erwähnt und ausführlich beschrieben in: H. WILBRAND. *Die hemianopischen Gesichtsfeld-Formen und das optische Wahrnehmungszentrum* Wiesbaden 1890. S. 142—143 und Taf. XI, Fig. 35.

Ophthalmoskopisch kein abnormer Befund.

Rechts centrale Maculae corneae.

»Die Gesichtsfeldprüfung erweist:

1) den Verlust jeder Farbenempfindung auf beiden Augen. Gleichzeitig kann durch Aussage des Patienten wie seiner Angehörigen mit Sicherheit der Beweis erbracht werden, dafs Patient bisher ein ungestörtes Farbenempfindungsvermögen besessen hat;

2) den Verlust der Raumempfindung auf den rechten Gesichtsfeldhälften und in dem oberen linken Gesichtsfeldquadranten zwei kongruente Defekte;

3) in den sub 2 angegebenen Teilen ist noch Lichtempfindung objektiv nachweisbar vorhanden. Patient empfindet subjektiv Flimmern in denselben.«

Infolge geeigneter klinischer Behandlung besserte sich das Sehen allmählich, und etwa 5 Wochen nach der Erkrankung war auf dem linken Auge die Sehschärfe auf $^1/_2$ gestiegen (auf dem rechten Auge ist die Sehschärfe von jeher infolge der Hornhauttrübung sehr gering gewesen).

»Auch in den für Farben- und Raumempfindung unempfindlichen Netzhauthälften wurde die Lichtempfindung lebhafter. Hingegen blieb Patient für die Gesamtnetzhaut absolut farbenblind. — Am Farbenkreisel geprüft ergaben:

200^0	weifs	+	160^0	schwarz	= hellgrau
20^0	»	+	340^0	»	= blau (*E*.1)
352^0	»	+	38^0	»	= gelb[1]
60^0	»	+	300^0	»	= rot (*G*.5).

Ferner wurden nach DAAE als gleich folgende Farben bezeichnet:

$$6C = 10C = 7F;$$
$$6D = 5B = 4F;$$
$$8D = 10C;$$
$$4E = 4B = 9B = 9C = 10C;$$
$$7G = 10G = 8B = 7C.$$

[1] Hier ist der im Original vorhandene Druckfehler beibehalten.

Für $2C$ wurde keine andere gleiche Farbe gefunden. In den PFLÜGERschen Tafeln werden die Buchstaben nur nach der Helligkeit erkannt.

Der Patient wird aus der Klinik entlassen und erliegt nach einigen Monaten einem schon länger bestehenden Herzleiden, ohne dafs in seinem Sehen eine fernere Änderung sich bemerkbar gemacht hatte.

Prüft man die hier angegebenen Helligkeitsgleichungen, so zeigt sich, dafs ein normales trichromatisches Auge sie bei mittlerer Tagesbeleuchtung im allgemeinen anerkennen kann; jedenfalls stimmen sie aber nicht mehr bei stark herabgesetzter Beleuchtung; und das müfste doch sein, wenn die hier entstandene totale Farbenblindheit derselben Art wäre, wie bei dem von Hr. HERING näher beschriebenen Fall.

Da ich aber sehr wohl weifs, wie leicht bei Versuchen, wo aus einer Anzahl vor dem Patienten ausgebreiteter Pigmentproben die gleich hellen ausgesucht werden sollen, besonders aber bei der DAAEschen Tafel, falsche Resultate, mindestens aber grofse Unsicherheiten unvermeidlich sind, so lege ich auf diese Beobachtungen kein grofses Gewicht.

3. Ein von Hrn. E. SIEMERLING[1] und mir beobachteter

[1] E. SIEMERLING, *Arch. für Psychiatrie*. Bd. 21. S. 284. 1889. (Vergl. auch H. WILBRAND, *Die hemianopischen Gesichtsfeld-Formen u. s. w.* S. 144.) Über diesen Fall hat Hr. E. SIEMERLING in der Sitzung der Gesellschaft der Charité-Ärzte am 7. Februar 1889 einen Vortrag gehalten, der zu einer längeren Diskussion Veranlassung gab. An dieser habe ich mich damals auch beteiligt, und meine Ausführungen sind nach stenographischer Aufzeichnung dann später in der *Berl. klin. Wochenschrift* (Jahrgang 1889, Nr. 33 und 34) veröffentlicht worden, ohne dafs ich, nachdem das Manuskript gesetzt war, die erbetene Revision erhalten. Aus dem Wortlaut dieser so entstandenen Publikation hat sich dann die Ansicht herausgebildet, dafs ich Anhänger der Theorie der Gegenfarben geworden sei. Da diese Mifsdeutung meiner Worte in weite Kreise, sogar in die Tagespresse (vergl. Berliner *Tägliche Rundschau*, 25. Februar 1890) übergegangen, nehme ich hier Veranlassung, jene Auslegung als unrichtig zu erklären, was ja der Inhalt der vorliegenden Abhandlung ohnehin beweist.

Fall erworbener totaler Farbenblindheit (verbunden mit homonymer Hemianopsie).

Ein 54 Jahre alter Zimmermann wurde während der Arbeit plötzlich schwindlig. Die Besinnung verlor er nicht ganz, die Sprache war nicht merklich beeinträchtigt und nach einer halben Stunde war er bereits wieder im stande, allein nach Hause zu gehen. Seitdem bemerkte er, dafs er zwar »die Gegenstände sehen, aber nicht erkennen konnte; erst wenn er sie anfafste, wufste er, was er vor sich hatte«. Diese Störung hob sich nicht, und der Patient liefs sich Anfang Januar 1889 in die »Charité« in Berlin aufnehmen.

Die Untersuchung des Gesichtsfeldes ergab, dafs in der rechten Hälfte beiderseits ein symmetrischer absoluter Defekt vorhanden war. In den erhaltenen Gesichtsfeldhälften wurden alle Farben als grau bezeichnet; sie unterschieden sich nur durch ihre gröfsere oder geringere Helligkeit. Der Fixationspunkt war noch erhalten, und es ergab sich eine Sehschärfe von ungefähr $^1/_{30}$. Beiderseits besteht Emmetropie.

Hr. SIEMERLING hatte die grofse Liebenswürdigkeit, mir die genaueste Untersuchung der Gesichtsempfindungen und -wahrnehmungen dieses Patienten zu gestatten, und ich erfreute mich dabei stets seiner bereitwilligsten Unterstützung, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen besten Dank sage.

Aus einer Unterhaltung mit dem Patienten gewann ich zunächst die völlige Gewifsheit darüber, dafs er sich der verschiedenen Farben noch sehr gut erinnerte und sich dieselben noch lebhaft vorstellen konnte. Er war sich, soweit man derartige Überlegungen von einem Manne seines Bildungsgrades erwarten kann, ganz klar darüber, dafs er jetzt von all jenen früher wahrgenommenen Farben nur noch Weifs, Grau und Schwarz sah. Damit war eine erworbene totale Farbenblindheit an einem vorher farbentüchtigen Individuum konstatiert, und zwar hatte sich die frühere dreifache Mannigfaltigkeit der Farben auf die einfache

Mannigfaltigkeit der Reihe Schwarz-Grau-Weifs reduziert, nicht auf die Helligkeitsabstufungen etwa von Rot oder Grün oder Blau. Die wichtigste Frage war nun, ob durch diese völlige Umgestaltung des Farbensystems auch eine Änderung in der Helligkeitsschätzung der verschiedenen Farben eingetreten war. Nach einigen vorläufigen Versuchen, die im Aussuchen von scheinbar gleichhellen farbigen Wollbündeln bestanden, schlug ich folgendes Verfahren ein.

Vor den Patienten wurde ein mit grüner Ölfarbe mittlerer Helligkeit angestrichener Karton hingelegt und dafür gesorgt, dafs alles oberflächlich reflektierte Licht vermieden war. Vor seinen Augen begann ich dann einen anderen Karton rot anzustreichen, und zwar in einem sehr hellen Farbentone. Der Patient bemerkte bald, dafs dieser zweite Karton viel heller wurde als der erste (grüne); ich mischte dem Rot nun Schwarz bei; darauf wurde er für dunkler erklärt. Es wurde nun etwas weniger Schwarz genommen u. s. f., bis der Patient endlich behauptete, die beiden Flächen könnten gar nicht mehr voneinander unterschieden werden. Dasselbe Verfahren wurde nun auch bei anderen Farben benutzt; bei Blau mufste Weifs zugemischt werden, um die gleiche Helligkeit zu erhalten. — Ich ging dann auch einmal von dem ungemischten Blau aus und erhielt nun natürlich eine zweite Reihe von Tafeln, die zu ihrer Herstellung alle viel mehr Schwarz erforderten.

Diese beiden Reihen mit Ölfarbe bestrichener Tafeln habe ich nun nachher selbst möglichst unbefangen auf ihre Helligkeit untereinander verglichen und auch unbeteiligten farbentüchtigen Personen (mit normalen trichromatischen Farbensystemen) zur Beurteilung vorgelegt: Das einstimmige Urteil ging dahin, dafs jede Reihe unter sich nahezu gleiche Helligkeit besafs.[1] Zufällig war das Rot der helleren Reihe bei-

[1] Leider sind die Farben inzwischen verschieden stark nachgedunkelt, so dafs sie nicht als dauernde Beweisstücke dienen können.

nahe identisch mit einem Rot, für welches Hr. A. BEYSSELL, der oben S. 54 erwähnte total Farbenblinde, vor einigen Jahren ein ihm völlig gleiches Grün ausgesucht hatte, so dafs man nun in der Lage war, dieses BEYSSELLsche Grün mit dem Grün jener helleren Reihe leicht und sicher vergleichen zu können: Die beiden Grün waren in ihrer Helligkeit ungemein verschieden, und zwar mufste das von Hrn. BEYSSELL ausgesuchte etwa zwanzigmal so stark beleuchtet werden, um die gleiche Helligkeit zu erhalten.

Aus der Gesamtheit dieser Beobachtungen geht also zweifellos hervor, dafs in dem hier beschriebenen Falle erworbener totaler Farbenblindheit die Helligkeitswerte der verschiedenen Farben durch den Wegfall der eigentlichen Farbenempfindung und die damit erfolgte Einschränkung des ganzen Gebietes der Gesichtsempfindungen auf die eindimensionale Reihe Schwarz-Grau-Weifs nicht beeinflufst wurden.

Die Sehschärfe des Patienten begann bald sich zu bessern; Ende Januar war sie bereits auf $^1/_2$ gestiegen; dann aber war nur noch ein langsamer Fortschritt zu konstatieren. Bei der letzten Prüfung, mehrere Monate später, betrug sie $^3/_5$. Gleichzeitig mit dieser Besserung begann auch die normale Farbenempfindung sich wieder einzustellen. Nach der Aussage des Patienten wurden die Farben zuerst »ganz weifslich, ganz matt« gesehen, dann erschienen sie immer »lebhafter«, bis nach einigen Monaten ihr früheres Aussehen beinahe, doch »nicht ganz so lebhaft, so glänzend« wieder vorhanden war. Sie erschienen »wie unter einem dünnen Schleier, in einem weifsen Dunst«. In diesem Stadium konnte ich mich durch die mannigfaltigsten Versuche davon überzeugen, dafs ein trichromatisches Farbensystem bestand.

Leider war der Patient (wahrscheinlich infolge der hemianopischen Gesichtsfeld-Beschränkung, verbunden mit seiner gänzlichen Ungeübtheit in derartigen Beobachtungen) nicht im stande, an einem spektralen »Farbenmischapparat« hinreichend

genaue Angaben zu machen, um aus ihnen irgend welche Schlüsse zu ziehen. Er verlor die relativ kleinen leuchtenden Flächen immer aus dem Gesichtsfeld.[1]

4. Ein von mir beobachteter Fall erworbener totaler Farbenblindheit, entstanden durch Ablösung und nachherige Wiederanlegung der Netzhaut.

Bereits in § 6 (S. 44 und 45) habe ich des hier näher zu besprechenden Falles gedacht. — H. X. erlitt vor etwa vier Jahren an seinem linken Auge, welches, wie oben schon erwähnt, dem anderen Auge bis dahin völlig gleich war, eine Netzhautablösung, die bis auf eine schmale peripherische Sichel das ganze Gesichtsfeld umfafste. Er hatte das Glück, dafs nach einer längeren sorgfältigen Behandlung die Netzhaut sich wieder anlegte und er ein skotomfreies Gesichtsfeld wiedererhielt. Etwa ein Jahr später, nachdem der Heilungsprozefs abgelaufen und der seitdem unverändert gebliebene Zustand bereits eingetreten war, habe ich die ersten Versuche vorgenommen, die dann mehrfach wiederholt wurden und stets dasselbe Resultat ergaben.

Das rechte (gesunde) Auge besitzt eine Myopie von ungefähr 4 Dioptrien und normale Sehschärfe (ca. 1 mit SNELLENschen Hacken). Es ist, wie oben schon erwähnt, dichromatisch und zwar gehört sein Farbensystem der sogenannten »rotblinden« Gruppe an. Eine Bestimmung der »Elementarempfindungskurven« nach denselben Methoden und an demselben Apparat, wie sie in der gemeinsam mit Hrn. C. DIETERICI ausgeführten und hier schon oft erwähnten Arbeit benutzt wurden, ergab für die Kurven dieselbe

[1] Neben den hier erwähnten Beobachtungen über die Farbenempfindungen konnte man in dem Patienten noch höchst interessante Studien darüber machen, wie ungemein leicht eine grofse Herabsetzung der Sehschärfe, vereinigt mit plötzlich erworbener totaler Farbenblindheit, die Erscheinungen der »Seelenblindheit« vortäuschen kann. Ich beabsichtige an anderer Stelle später darauf näher einzugehen und verweise vorläufig auf die bezüglichen Mitteilungen in der oben citierten SIEMERLINGschen Abhandlung.

Gestalt, welche wir damals für diese Gruppe gefunden hatten. Der »neutrale Punkt«, d. h. die weifs erscheinende Stelle im Spektrum fand sich nach dem früher von mir zu seiner Aufsuchung angegebenen Verfahren[1] je nach der benutzten Helligkeit zwischen zwei 495,6 $\mu\mu$ und 498,4 $\mu\mu$.

Die aus zwei Beobachtungsreihen (welche, wie schon früher erwähnt, ungefähr bei der Helligkeitsstufe *F* ausgeführt wurden) gewonnenen Kurven der Helligkeitswerte sind bereits oben in der letzten Kolumne der auf S. 46 abgedruckten Tabelle enthalten. Es ist dort schon darauf hingewiesen, dafs die Werte sehr nahe mit denjenigen des ebenfalls »rotblinden« Hrn. RITTER übereinstimmen, wie auch ein Blick auf Tafel V zeigt.

Bei dem linken (kranken) Auge besteht Metamorphopsie. Die Gegenstände erscheinen so, als wenn man sie durch ein Glas mit unregelmäfsig-wellige Oberfläche betrachtet. Die Sehschärfe im Fixationspunkt ist zwar nur gleich $^1/_{20}$; aber da Hr. X. mit physikalischen Beobachtungen vertraut ist, so gelingt es trotzdem, recht ausgiebige Versuchsreihen mit spektralem Lichte anzustellen.

Hr. X. erklärt, dafs er mit diesem Auge (abgesehen natürlich von dem oben erwähnten peripheren sichelförmigen Teile des Gesichtsfeldes) die Gegenstände nur in den Abstufungen von Hell und Dunkel sehe und keinerlei Farbenunterschiede wahrnehme, was auch an spektral erleuchteten Feldern sich bestätigt fand. Stets gelingt es durch blofse Änderung der Helligkeit völlige Gleichheit herzustellen, wenn die beiden in dem Spektralapparate aneinanderstofsenden Halbkreise mit Licht der verschiedensten Wellenlängen erleuchtet sind, selbst bei Benutzung der äufsersten noch sichtbaren Enden des Spektrums. Hierdurch war die völlige

[1] A. KÖNIG, *Gräfes Archiv f. Ophthalm.*, Bd. 30. (2). S. 162. 1884. und *Wiedem Ann.*, Bd. 22. S. 572. 1884.

Monochromasie der Empfindungen des linken Auges aufser jeden Zweifel gestellt.

Um nun die Qualität der Empfindung des linken Auges (im Vergleich zu den Empfindungen des rechten Auges) so objektiv als möglich zu bestimmen, wurden folgende Wege eingeschlagen.[1]

Hr. X. suchte zuerst, indem er abwechselnd mit dem rechten und linken Auge in den jetzt nur auf dem einen Halbkreise erleuchteten Apparat hineinblickte, diejenige Wellenlänge, welche ihm auf beiden Augen denselben Eindruck machte. Die Einstellungen schwankten zwischen 494 $\mu\mu$ und 498 $\mu\mu$, fielen also mit der Stelle des »neutralen Punktes« zusammen. Ferner betrachtete Hr. X. mit dem linken Auge die verschiedensten Gegenstände seiner Umgebung (weifses Papier, die gelbliche Tischplatte, hellblauen Karton u. s. w.), sowohl bei Sonnen- als auch bei Gasbeleuchtung, und suchte für jeden Gegenstand mit dem rechten Auge im Spektralapparat diejenige Wellenlänge, welche, auf ungefähr dieselbe Helligkeit gebracht, ebenso aussah. Das Urteil war hier viel unsicherer; es kamen Schwankungen bis zu 6 $\mu\mu$ vor. Das Mittel aller Einstellungen betrug 496,3 $\mu\mu$, fiel also ebenfalls in die »neutrale« Stelle des Spektrums. Damit war also nachgewiesen, dafs alle Empfindungen des linken Auges völlig farblos waren, d. h. nur aus den Übergangsstufen von Schwarz-Grau-Weifs bestanden.

Ich bestimmte nun die Kurve der Helligkeitswerte in diesem monochromatischen System und zwar bei derselben Helligkeitsstufe, welche für das rechte dichromatische Auge benutzt worden war.

Der mittlere Fehler bei der Einstellung auf gleiche

[1] Hr. E. Hering hatte damals noch nicht sein äufserst einfaches Verfahren veröffentlicht (*Gräfes Arch.*, Bd. 36 (3). S. 1. 1890), welches uns jetzt in den Stand setzt, derartige binokulare Farbenvergleiche so ungemein sicher und schnell ausführen zu können.

Helligkeit der hier ja stets farbengleichen beiden Halbkreise war viel gröfser als bei normalen Augen unter gleichen Umständen. Es mufs dieses hauptsächlich darauf geschoben werden, dafs infolge der geringen Sehschärfe die vertikale Trennungslinie der beiden Felder niemals scharf gesehen wurde.[1]

Es wurde aber doch eine glatte Kurve der spektralen Verteilung der Helligkeitswerte für dieses Auge erzielt und es stellte sich das höchst beachtenswerte Ergebnis heraus, dafs die hier, also an dem total farbenblinden linken Auge, erhaltenen Helligkeitswerte bis auf Abweichungen, die im Maximum 7% betrugen, mit denjenigen des partiell farbenblinden rechten Auges übereinstimmten. Ich unterlasse es, die Zahlen mitzuteilen, und bemerke nur noch, dafs die Abweichungen ganz unregelmäfsig verteilt waren.

Endlich machte Hr. X. noch folgende Versuche: Mit dem rechten partiell farbenblinden Auge wurden Farbengleichungen zwischen einer Mischung der Lichter aus den beiden Endstrecken des Spektrums einerseits und den dazwischen gelegenen homogenen Lichtern andererseits hergestellt; jede dieser Farbengleichungen wurde dem linken total farbenblinden Auge zur Beurteilung vorgelegt und von diesem, wie freilich nicht anders zu erwarten war, als richtig befunden; nur bei einer der vielen derartigen Gleichungen, als eine Mischung von 590 $\mu\mu$ und 470 $\mu\mu$ homogenem Lichte von 530 $\mu\mu$ für das rechte Auge gleich gemacht worden war, erschien dem linken Auge das homogene Feld etwas dunkler. Bei einer Wiederholung derselben Gleichung an einem anderen Tage trat diese Abweichung

[1] Wenn ich meine eigene Sehschärfe durch gefettete und mit Lykopodiumsamen bestreute Gläser auf das gleiche Mafs herabsetze, so sinkt auch meine Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede bedeutend, freilich nicht bis zu derjenigen, welche Hr. X. auf dem linken Auge besitzt.

nicht mehr hervor. Worin sie ihre Ursache gehabt hat, vermag ich nicht anzugeben.

Ebenso wie in dem unter 3 (und wahrscheinlich auch wie in dem unter 2) mitgeteilten Falle hat also auch hier der Verlust der eigentlichen Farbenempfindung keine Änderung in den Helligkeitswerten der verschiedenen Lichter zur Folge gehabt, und doch war die Natur der eingetretenen Störung in beiden Fällen so verschieden wie nur denkbar. Das eine Mal ist die Ursache ein cerebraler, das andere Mal ein peripherer, sich in der Netzhaut abspielender Prozefs.

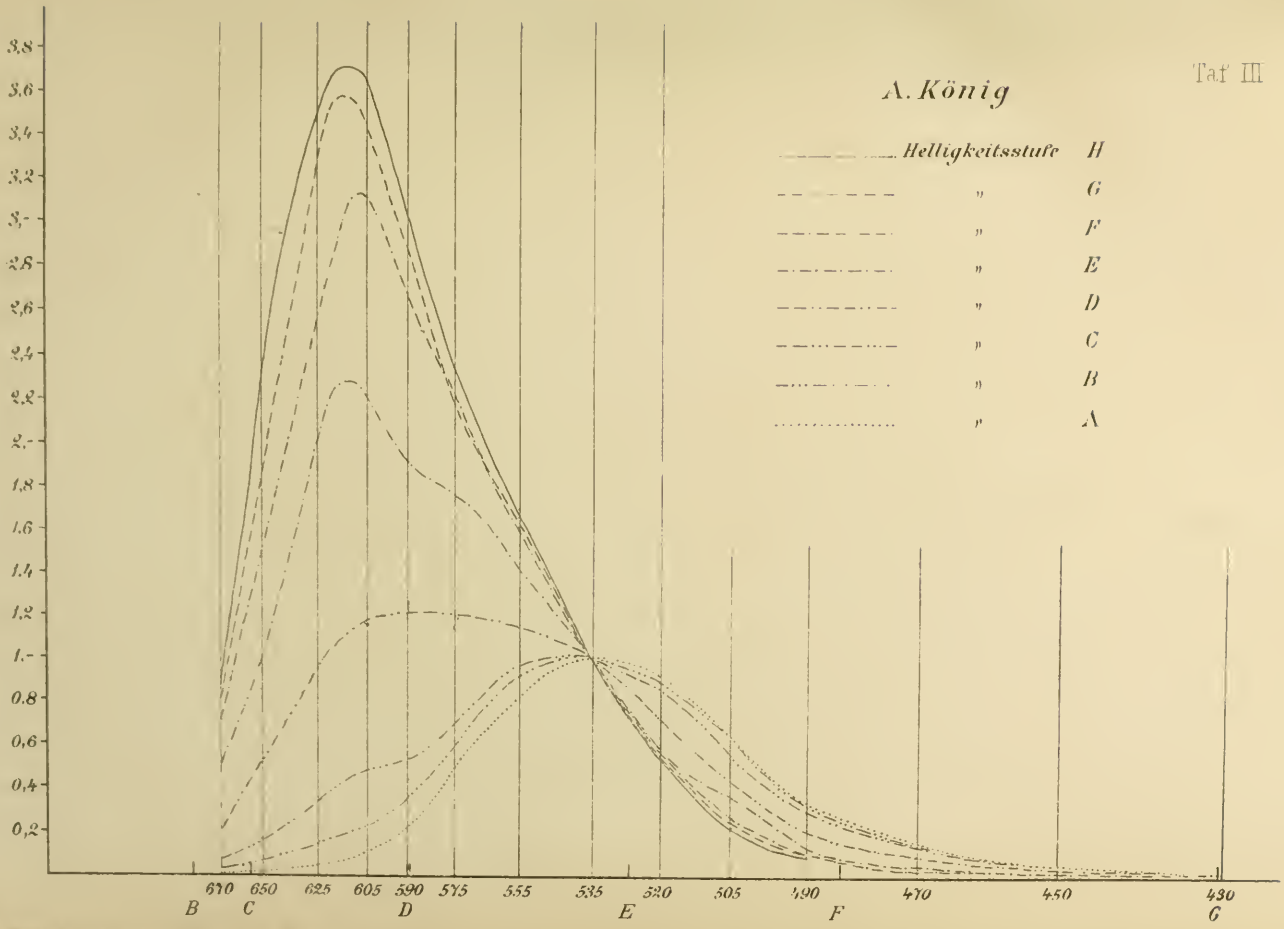
§ 12. Schlufsbemerkung.

Indem ich meine Darlegungen hiermit der Öffentlichkeit übergebe, bin ich mir wohl bewufst, — was ich auch schon an mehreren Stellen nachdrücklich hervorgehoben habe, — dafs dieselben durchaus keinen abschliefsenden Charakter tragen. Eine grofse Anzahl von Fragen konnte mehr angedeutet als gelöst werden; und fast überall trat das Lückenhafte des Beobachtungsmaterials hervor. Trotzdem denke ich aber doch, dafs meine Arbeit nicht ganz ohne Wert ist.

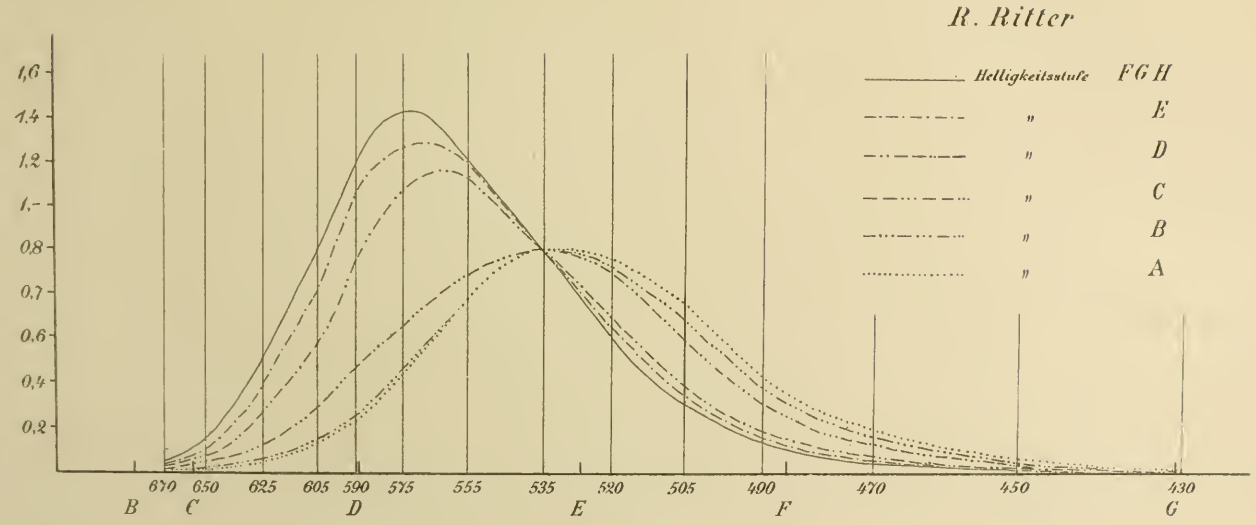
Einerseits weist sie eindringlicher, als es bisher geschehen ist, darauf hin, dafs die YOUNG-HELMHOLTZsche Farbentheorie, wie aber auch wohl zur Zeit von allen ihren Vertretern zugestanden wird, die Form der Grundempfindungskurven als Variable der Helligkeit ansehen mufs, und dafs in der Bestimmung dieser Abhängigkeit ihre nächste Weiterentwickelung zu suchen ist.

Andererseits sind aber auch Beobachtungen mitgeteilt, welche mit der HERINGschen Farbentheorie, soviel ich sehen kann, zunächst noch in unvereinbarem Widerspruch stehen und die früher oder später dazu nötigen werden, mindestens eine durchgreifende Umgestaltung derselben vorzunehmen.

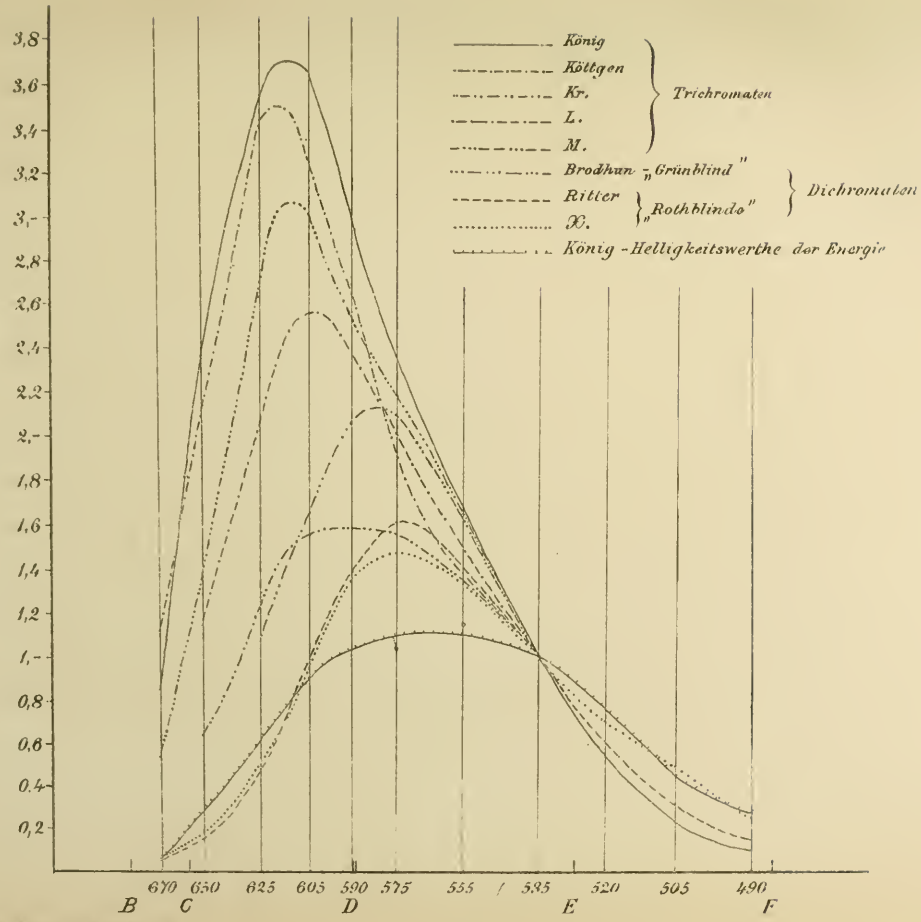
Ohne Abneigung und ohne Vorliebe für die eine oder die andere der auf dem Gebiete der Farbenlehre noch mit einander streitenden Auffassungen habe ich aufrichtig versucht, nur die Thatsachen reden zu lassen, und ich bin gewifs, damit voll und ganz im Sinne und als Schüler des grofsen Meisters gehandelt zu haben, dem diese Arbeit als festlicher Gruſs gewidmet ist.

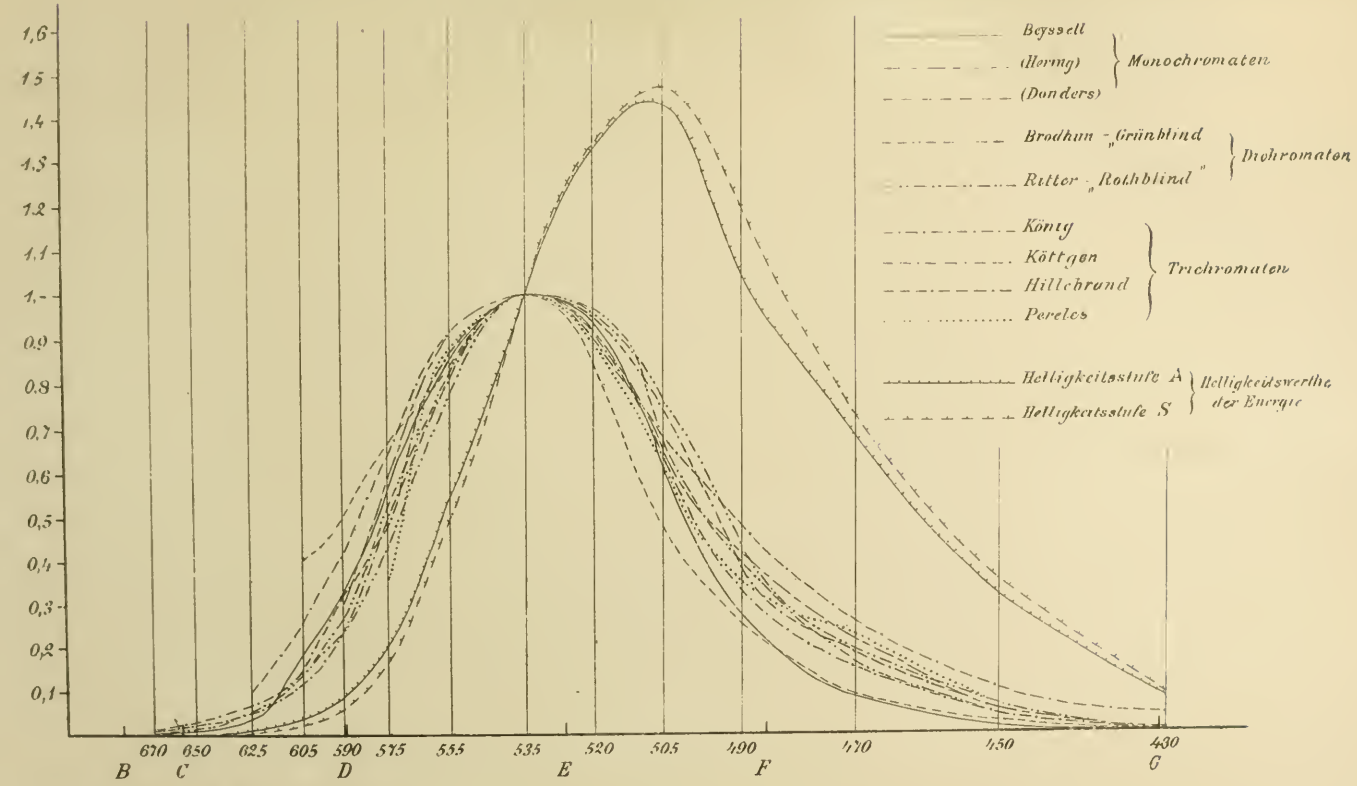


Verlag von Leopold Voss in Hamburg



Verlag von Leopold Voss in Hamburg


König
Köttgen
Kr.
L.
M.
Trichromaten
Brodhun „Grünblind"
Ritter „Rothblinde"
W.
Dichromaten
König - Helligkeitswerthe der Energie
3,8
3,6
3,4
3,2
3,-
2,8
2,6
2,4
2,2
2,-
1,8
1,6
1,4
1,2
1,-
0,8
0,6
0,4
0,2
670 650 625 605 590 575 555 / 535 520 505 490
B C D E F


1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,-
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
670
650
625
605
590
575
555
535
520
505
490
470
450
430
B
C
D
E
F
G
Beyssell
(Herng)
(Donders)
Monochromaten
Brodhun „Grünblind"
Ritter „Rothblind"
Dichromaten
König
Köttgen
Hillebrand
Pereles
Trichromaten
Helligkeitsstufe A
Helligkeitsstufe S
Helligkeitswerthe der Energie

QP481 K832

König
Über den helligkeitswert der spektralfarben [illegible]